

**OPTIMIZACIÓN DE ESTRUCTURAS APORTICADAS, MEDIANTE UN
PROCEDIMIENTO DE ESTRUCTURACIÓN ENFOCADO EN ELEMENTOS TIPO
COLUMNA**

ING. WILLINGTON VERGEL GALVÁN



**UNIVERSIDAD DE LA COSTA CUC
MAESTRIA EN INGENIERÍA
BARRANQUILLA
2018**

**OPTIMIZACIÓN DE ESTRUCTURAS APORTICADAS, MEDIANTE UN
PROCEDIMIENTO DE ESTRUCTURACIÓN ENFOCADO EN ELEMENTOS TIPO
COLUMNA**



ING. WILLINGTON VERGEL GALVÁN

**Proyecto, Como Requisito Para Optar
Al Título De Magister En Ingeniería**

TUTOR:
Ph.D. MARIAN SABAU

COTUROR:
Ph.D. ALFREDO ROA

**UNIVERSIDAD DE LA COSTA CUC
MAESTRIA EN INGENIERÍA
BARRANQUILLA**

2018

Contenido	Pág.
Capítulo 1	13
1.1. Planteamiento del problema	13
Capítulo 2	16
2.1. Objetivo	16
2.1.1. Objetivo General	16
2.1.2. Objetivo Especifico	16
Capítulo 3	17
3.1. Marco referencial	17
3.1.1. Marco Teórico	17
3.1.2. Formulación del diseño óptimo de estructuras	19
3.1.2.1. Variables de diseño	19
3.1.2.2. Función objetivo	20
3.1.2.3. Restricción	22
3.1.2.4. Metodología para formular y resolver un problema de optimización	23
3.1.2.4.1. Diseño óptimo	23
3.1.2.4.2. Criterios de optimización	24
3.1.2.4.3. Modelo matemático	24
3.1.3. Fundamentos del método matricial de rigidez	26
3.1.4. Consideraciones en el análisis sismo-resistente	30
3.1.5. Método de la fuerza horizontal equivalente	31

3.2. Estado del Arte	33
Capítulo 4	51
4.1. Diseño metodológico	51
4.1.1. Recopilación de información y definición del método que se va a utilizar	51
4.1.2. Modelo diseño estructural inicial	52
4.1.3. Formulación del modelo matemático	53
4.1.4. Optimización estructural	54
4.1.5. Análisis de resultados	55
4.1.6. Formulación de conclusiones	55
Capítulo 5	57
5.1. Desarrollo del proyecto	57
5.1.1. Modelo Estructural Inicial	57
5.1.2. Definición del sistema y estructuración	57
5.1.3. Formulación del modelo matemático	62
5.1.4. Metodología general para resolver el problema planteado	67
5.1.5. Análisis de resultados	78
Conclusiones	83
Referencias	84

Resumen

Las estructuras son sistemas destinados a soportar solicitaciones satisfaciendo unos niveles de servicio establecidos. Todos los diseños no son idénticos, se realizan por etapas que eliminan alternativas no adecuadas y al final debe obtenerse una solución eficiente; se establecen los objetivos que debe cumplir la estructura y se determinan algunas características fijas del diseño, como especificaciones técnicas de los materiales, predimensionamiento entre otros. Lo que se busca con el diseño tradicional de estructuras, es hallar una solución que cumpla los requisitos existentes según la normatividad vigente.

El objetivo de este trabajo es encontrar las secciones óptimas para los elementos de corte de una edificación nueva, a través de un modelo matemático que permitirá representar de forma simplificada la realidad del problema a modelar.

Como función objetivo de optimización se utilizó, deriva máxima de piso según la NSR-10; como variables tenemos la sección transversal final de los elementos de corte; y como restricciones tenemos los desplazamientos horizontales en los nudos.

Se describen los aspectos teóricos asociados al análisis estructural de una edificación nueva, implementando el método de la fuerza horizontal equivalente, en lo concerniente al análisis sísmico, y el método de la rigidez por medio de un análisis matricial en lo referente al análisis estructural para el cálculo de los desplazamientos.

También se expondrá el concepto de optimización, la programación no lineal, y los modelos matemáticos asociados a este tipo de programación, hasta llegar a formula la función objetivo con la cual se conseguirán los objetivos planteados en este trabajo.

Palabras clave: Optimización estructural, programación no lineal, análisis matricial, método de rigidez, estructuras aporticadas.

Abstract

Structures are systems designed to withstand stresses satisfying established service levels. All the designs are not identical, they are made by stages that eliminate unsuitable alternatives and in the end an efficient solution must be obtained; the objectives that the structure must meet are established and some fixed characteristics of the design are determined, such as technical specifications of the materials, pre-dimensioning among others. What is sought with the traditional design of structures, is to find a solution that meets the existing requirements according to current regulations.

The objective of this work is to find the optimal sections for the cutting elements of a new building, through a mathematical model that will allow to represent in a simplified way the reality of the problem to be modeled.

As an objective function of optimization, maximum floor drift was used according to the NSR-10; as variables we have the final cross section of the cutting elements; and as restrictions we have the horizontal displacements in the knots.

The theoretical aspects associated to the structural analysis of a new building are described, implementing the equivalent horizontal force method, in regard to the simian analysis, and the method of the rigidity by means of a matrix analysis in relation to the structural analysis for the calculation of the displacements.

The concept of optimization, non-linear programming, and the mathematical models associated with this type of programming will also be exposed, until the objective function is formulated with which the objectives set out in this work will be achieved.

Keywords: Structural optimization, non-linear programming, matrix analysis, stiffness method, contributed structures.

Introducción

El problema de la optimización en estructuras se puede abordar desde diferentes enfoques, dividiéndose fundamentalmente en los siguientes:

- 1. Optimización del tamaño:** Trata de determinar las medidas óptimas de los elementos que constituyen una estructura de forma predefinida. Es el enfoque más sencillo ya que el número de variables del problema es bastante limitado (Caballero, 2012).
- 2. Optimización de la forma:** Trata de buscar la forma óptima de una estructura de topología fija. En este enfoque, partiendo de una forma predefinida se busca optimizar esta mediante la modificación de la conectividad entre elementos o mediante la eliminación de los elementos menos esforzados (Caballero, 2012).
- 3. Optimización de la topología:** Trata de buscar la distribución óptima del material en una estructura, mediante la supresión de elementos y/o la modificación de la conectividad y/o de las coordenadas nodales. Este enfoque es el más complicado porque la cantidad de variables que aborda es elevada. En todos los trabajos publicados hasta la fecha se parte siempre de una morfología previa (Caballero, 2012).

En el presente trabajo se emplea el enfoque de **optimización por tamaño**, planteando un procedimiento para optimizar la estructuración (dimensiones, orientación y rigidez lateral), de los elementos de corte (columnas), de un pórtico en concreto reforzado, teniendo como base las

restricciones que solicita la norma sismo resistente colombiana NSR-10, en cuanto a desplazamientos y derivas máximas, con lo que disminuirán al máximo las dimensiones finales de los elementos estructurales de resistencia sísmica y resistencia a cortante, y por ende las cantidades de material (concreto, áreas de acero de refuerzo), que conforman estos elementos estructurales.

El proceso de optimización, basado en el diseño tradicional, es un proceso iterativo donde poco a poco se va modificando la geometría de las secciones del diseño inicial, realizado generalmente de forma subjetiva. De este modo en cada etapa se comprueba el cumplimiento de las restricciones de seguridad y diseño impuestas a la estructura y se propone de un modo más o menos científico las modificaciones a realizar en la geometría para la siguiente etapa. Este proceso es extremadamente costoso para un cálculo manual y su aparición es relativamente reciente debida a la utilización de los ordenadores personales. El proceso tradicional de optimización generalmente solo aborda la optimización de la geometría de la estructura y suele presentar una única solución óptima (Caballero, 2012)

En este estudio se analiza el diseño asistido óptimo de estructuras a partir de una perspectiva metodológica general, desarrollando un modelo matemático no lineal basado en el uso de comandos o funciones del lenguaje computacional MATLAB (“MATLAB - El lenguaje del cálculo técnico,” 2018)

Justificación

El alto costo de materias primas y el incremento de la demanda de estas, está generando en las empresas una concientización a optimizar costos en los proyectos de edificaciones nuevas, que en el caso de las estructuras pasa por reducir el peso de las mismas.

El análisis y diseño estructuras se basa en un conjunto de condiciones y teorías, como la resistencia de materiales, que permiten al ingeniero calculista establecer los materiales y geometrías necesarias para soportar un conjunto de esfuerzos y reacciones.

Ahora bien, estos diseños generalmente no serán óptimos desde el punto de vista económico o de ahorro de materiales, ya que se encuentran afectados por una serie de decisiones subjetivas durante el proceso de diseño. De este modo, dos proyectistas diferentes llegarán a dos soluciones diferentes perfectamente factibles desde el punto de vista de la resistencia estructural o del cumplimiento de normas. Sin embargo, estas estructuras seguramente tendrán costes y pesos diferentes.

No obstante, el lograr optimizar las secciones de los elementos de corte en estructuras aporticadas, llevara a estas últimas a ser más liviana debido a la reducción de sus dimensiones y disminución en su acero de refuerzo; lo que finalmente se verá reflejado en un ahorro desde el punto de vista económico, dado que se minimizaran las cantidades de material requerido para la construcción de la superestructura.

Se propone emplear para el modelo matemático de optimización, un modelo no lineal, en el que se definirán los parámetros tales como la función objetivo, las restricciones y sus respectivas variables.

Lista de tablas y figuras**Tablas**

Tabla 5.1 Combinación de cargas utilizadas en el análisis de cargas.....	58
--	----

Figuras

Figura 3.1 Regiones factibles en el plano.....	25
Figura 3.2 Matriz de rigidez de un elemento tipo pórtico.....	27
Figura 3.3 Análisis matricial de estructuras por el método de la rigidez.....	28
Figura 3.4 Matriz de rotación con 6 grados de libertad.....	28
Figura 3.5 Matriz global de la estructura.....	29
Figura 3.6 Relación entre la matriz de rigidez y el desplazamiento elástico.....	30
Figura 5.1 Nivel de amenaza sísmica.....	58
Figura 5.2 Espectro elástico de diseño S_a	59
Figura 5.3 Grafica aceleración espectral S_a	59
Figura 5.4 Fuerza sísmica de diseño.....	60
Figura 5.5 Exponente k para el cálculo del periodo inicial.....	60
Figura 5.6 Fuerza horizontal equivalente por nivel.....	61
Figura 5.7 Evaluación periodo fundamental de la estructura.....	61
Figura 5.8 Calculo deriva máxima.....	62
Figura 5.9 Grafica deriva máxima.....	62
Figura 5.10 Parámetros asignados y variables de diseño.....	63
Figura 5.11 Modelo 3D pórtico que conforma la estructura.....	65
Figura 5.12 Pórtico que conforma la estructura.....	66
Figura 5.13 Propiedades de los materiales.....	66

Figura 5.14 Nomenclatura elementos estructurales.....	67
Figura 5.15 Matriz de rigidez de un elemento frame en coordenadas locales.....	68
Figura 5.16 Matriz de transformación de coordenadas locales a coordenadas globales.....	69
Figura 5.17 Matriz de rigidez para un elemento frame en coordenadas globales.....	69
Figura 5.18 Matriz de rigidez para el pórtico A.....	70
Figura 5.19 Ecuaciones en forma general para el pórtico A.....	71
Figura 5.20 Función objetivo para el modelo matemático en MATLAB.....	73
Figura 5.21 Función fmincon en MATLAB, para los parámetros asignados.....	74
Figura 5.22 Restricciones de igualdad en MATLAB, para los parámetros asignados.....	75
Figura 5.23 Restricciones de desigualdad en MATLAB.....	76
Figura 5.24 Resultado dimensión óptima para los parámetros solicitados.....	77
Figura 5.25 Verificación deriva máxima con l (optimizado) de 0.40M.....	78
Figura 5.26 Gráfica verificación deriva máxima con l (optimizado) de 0.40M.....	78
Figura 5.27 Gráfica interacción de ℓ (optimizado) para diferentes % de incremento en la FHE del pórtico.....	79
Figura 5.28 Valores que toma l (optimizado) para diferentes % de incremento en la FHE...	79
Figura 5.29 Fuerzas horizontales para cada nivel del pórtico A.....	80
Figura 5.30 Desplazamientos nivel 2 del pórtico A, en la primera interacción.....	81
Figura 5.31 Desplazamientos nivel 1 del pórtico A, en la primera interacción.....	81
Figura 5.32 Deriva máxima del pórtico A, calculada con los desplazamientos obtenidos implementando el software sap-2000.....	82

Capítulo 1

1.1 Planteamiento del problema

La evolución histórica y el desarrollo metodológico de las técnicas de optimización estructural están marcadas por una serie de hitos de importancia singular, que provocaron alteraciones radicales en los planteamientos asumidos por la comunidad científica hasta el momento de su aparición, o cuanto menos permitieron la apertura de nuevas y profundas líneas de investigación (Hernández Ibáñez, 1990; Sanchez-Caballero, Sellés Cantó, Pla-Ferrando, & Peydró Rasero, 2012).

En las últimas décadas, sin embargo, y como sucede en tantas otras ramas de la ciencia, el crecimiento constante del volumen de investigaciones en curso, la aplicación generalizada de técnicas de gran sofisticación, la interrelación existente entre brechas de conocimiento dispares, la calidad y cantidad de conocimientos acumulados, y la transmisión constante de información entre los científicos, han provocado un cambio cualitativo en la evolución de las técnicas de optimización estructural. La evolución marcada por hitos aislados y claramente identificables de antaño se ha transformado en la actualidad en una evolución casi continua (Hernández & Brebbia, 2001; Hernández & Fontan, 2002).

Caballero (2012) en su tesis doctoral va más allá en el proceso de la optimización simultánea de las variables de diseño, definiendo un algoritmo que no parte de una estructura predefinida, y que incorpora los parámetros que determinan la geometría. A diferencia de los métodos actuales el algoritmo desarrollado no requiere de ningún tipo de estructura inicial, ni

otro tipo de información adicional, de los puntos de aplicación de las cargas, los puntos de apoyo y los tipos de apoyo.

Romani Loayza (2002) en su tesis de maestría, propone un procedimiento para obtener el diseño de estructuras aporticadas de mínimo costo, partiendo de la consideración que el costo de la estructura está relacionado directamente con la cantidad de concreto, acero refuerzo y encofrado.

Señís López (2014) en su tesis doctoral, establece un procedimiento para la optimización de mallas estructurales de acero, envolventes de edificios en altura, como tipología estructural de entramado en tubo. Para ello, se realiza un estudio comparativo estructural, de acuerdo al análisis de las direcciones de las tensiones principales, para determinar si las mallas espaciales analizadas son óptimas y eficientes cuando su diseño se adapta, o asemeja, a la trayectoria de las líneas isostáticas de los elementos estructurales equivalentes de alma llena, bajo las acciones solicitantes que deben resistir, a la vez que se atiende a las cuestiones arquitectónicas del proyecto.

Sánchez Caballero (2012) ha llegado a identificar, que el proceso de optimización basado en el diseño tradicional, es un proceso iterativo donde poco a poco se va modificando la geometría de las secciones del diseño inicial, realizado generalmente de forma subjetiva; de este modo en cada etapa se comprueba el cumplimiento de las restricciones de seguridad y diseño impuestas a la estructura y se propone de un modo más o menos científico las modificaciones a realizar en la geometría para la siguiente etapa. Este proceso es extremadamente costoso para un cálculo manual y su aparición es relativamente reciente debida a la utilización de los ordenadores personales. El proceso tradicional de optimización generalmente solo aborda la optimización de la geometría de la estructura y suele presentar una única solución óptima.

Por otra parte, la mala estructuración de los proyectos de edificación está generando diseños sobredimensionados y sobre reforzados, por lo que este, es uno de los factores que lleva a un incremento en las dimensiones finales, y áreas de acero de refuerzo de los elementos estructurales de corte (columnas); lo que nos lleva al siguiente interrogante:

¿Las dimensiones de los elementos tipo columna en estructuras aporticadas, se podrán disminuir optimizando el diseño estructural?

Capítulo 2

2.1. Objetivos

2.1.1. Objetivo General

Optimizar la estructuración de los elementos de corte de una edificación nueva, teniendo como base las restricciones que solicita la norma sismo resistente colombiana NSR-10, con el fin de disminuir al máximo las dimensiones finales de los elementos estructurales de resistencia sísmica y resistencia a cortante.

2.1.2. Objetivos Específicos

- Recopilar la información necesaria, que sirva como entrada para el planteamiento del modelo matemático.
- Realizar el análisis estructural de una estructura aporticada en concreto reforzado por los métodos tradicionales según la NSR-10, cuando la estructura está sometida a fuerzas horizontales debido a cargas de sismo.
- Desarrollar procedimientos numéricos necesarios, que lleven al planteamiento matemático del proceso de optimización estructural, enfocado en las columnas.
- Realizar el análisis estructural del modelo inicial de evaluación, utilizando las secciones transversales optimas, obtenidas al correr el modelo matemático de optimización.
- Evaluar los resultados obtenidos mediante el modelo de optimización y compararlos con los resultados del análisis por los métodos tradicionales.

Capítulo 3

3.1. Marco referencial

3.1.1. Marco Teórico

Las décadas de 1960 y 1970 se caracterizaron por dificultades para resolver pequeños problemas de optimización, olvidando por el momento criterios de optimización (Wang, Cheng, & Hsu, 2010).

La optimización hace posible reducir la cantidad de recursos que son destinados a la solución de un problema de ingeniería, facilitando el desarrollo de los procesos y orientándolos en la dirección apropiada, disminuyendo el tiempo y por ende los costos económicos. No obstante, el desarrollo formal de los métodos de optimización computacional es relativamente reciente y tuvo sus inicios a partir de la segunda década del siglo pasado, de la mano con los avances en la informática aplicada e inteligencia artificial. (Wang et al., 2010).

Históricamente, ha habido una tensión entre los defensores de la optimización clásica, y los de esquemas heurísticos tales como métodos de criterios de optimización que al mismo tiempo afirmaba que los métodos clásicos eran incapaces de resolver estructuras reales (grandes). En vista de las herramientas ahora disponibles para el ingeniero, estos argumentos pueden verse disminuidos en importancia, aunque en los criterios de optimización estos métodos siguen teniendo un enorme atractivo físico.

Un miembro estructural queda diseñado para resistir una cierta combinación de cargas durante su vida de servicio. Cualquier miembro que resista la combinación de cargas impuestas en el proyecto constituirá un diseño válido.

De este modo la optimización estructural se basa en restringir el diseño de un sistema estructural de modo que se llegue a una solución la cual, aparte de resistir las cargas correspondientes, se adapte lo mejor posible a ciertos escenarios que el proyectista considera oportunos, tales como mínima cantidad de material utilizado, mínimas energías de deformación, restricciones de tensiones en ciertas secciones, restricciones de deformaciones, entre otros.

Este tipo de optimización se basará en la fiabilidad de la estructura, es decir, la capacidad que presenta la misma para resistir las diferentes cargas a las que ha de estar sometida durante su vida de servicio, además de desarrollar sus funciones de forma suficiente durante su vida útil, quedando su funcionamiento dentro de los estados límite último y de servicio definidos para la misma. Por ello, en todo problema de optimización estructural debe definirse el sistema estructural sobre el cual se va a trabajar, así como las cargas impuestas sobre el mismo, como punto de partida.

Posteriormente se implementará la optimización que trabajará sobre ciertos parámetros de interés. Estos parámetros de interés se denominan funciones de optimización. Las diferentes funciones de optimización aplicadas al sistema estructural serán distintas para cada caso concreto, pudiendo el proyectista definirlas según requieran las características propias del proyecto o según su propio criterio.

Cada una de las funciones de optimización depende de una serie de parámetros estructurales, de índole geométrica o característica del material. Estas variables se denominan variables de optimización.

3.1.2. Formulación del diseño óptimo de estructuras.

En los problemas de optimización una vez definidas las restricciones, escogemos, según el método de solución a ser implementado, valores apropiados que satisfagan las restricciones y atiendan la preferencia establecida en una cierta función llamada función objetivo. Se parte de elegir sistemáticamente los valores de entrada de modo que se obtengan unos valores de salida mediante una “función objetivo”.

3.1.2.1. *variables de diseño.*

En primer lugar, es necesario distinguir entre las magnitudes que intervienen en un diseño, cuyos valores pueden ser modificados, y aquellas magnitudes cuyos valores están fijados por factores externos, y por tanto fuera de los límites del diseño. Los parámetros del problema representan magnitudes cuyo valor es constante durante todo el diseño y son consecuencia, en general, de una serie de condiciones impuestas externamente al problema. Por el contrario, las variables hacen referencia a magnitudes cuyos valores pueden cambiar a lo largo de la evolución del diseño.

En el caso más general, se distinguen cuatro tipos de variables:

- Propiedades de la sección de la pieza: área, momentos de inercia, y de torsión, etc.
- Geometría de la estructura: altura, longitud, espesor, etc.
- Topología de la estructura: densidad del material, perímetro total, etc.
- Propiedades constitutivas: módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson, etc.

La importancia de una adecuada elección de las variables de diseño es trascendente, ya que de esta elección dependen soluciones prácticas y bien condicionadas.

3.1.2.2. *función objetivo.*

La tarea que realiza un diseñador puede ser planteada de manera analítica con miras a generar ciclos de análisis – diseño que posibiliten comparar diferentes alternativas y decidir bajo ciertas restricciones en las variables de entrada y de respuesta de la estructura que permitan optimizar alguna característica importante para el desempeño o costo, como puede ser el peso o un límite de desplazamiento (Luemberger, 1989).

La función objetivo, es la función que mide cualitativamente el funcionamiento del sistema en un proceso de optimización, de modo que lo que se busca es la maximización o minimización de esta, enmarcado en una gama de posibles soluciones (Negrín Montecelo, 2010).

Esta función representa la propiedad más importante del fenómeno analizado o del diseño, en el caso del diseño estructural de una cercha, será el peso o el costo de la misma, y para nuestro caso, que corresponde a estructuras aporticadas, la función objetivo será aquella que garantice el equilibrio de la estructura, con secciones mínimas en los elementos de corte (columnas), cuando esta es sometida a fuerzas horizontales debidas a sismo.

Se puede definir el problema de la optimización como:

- Min $f(x)$, sujeto a:
- $g(x)=0$
- $h(x)\leq 0$

En donde:

- x , es la variable de diseño
- $f(x)$, es la función objetivo

En general, las funciones en $f(x)$, $g(x)$, $h(x)$, pueden ser lineales y/o no lineales; sin embargo, en nuestro caso particular, tratándose de un problema de optimización no lineal, al menos alguna función de las antes mencionadas debe ser no lineal (Negrín Montecelo, 2010). La complejidad de un problema de optimización viene dada por el tamaño del “espacio de búsqueda o hiperespacio” (cantidad de variables) y que tan complicada es la representación de dichas variables. Dicha representación de la solución se conoce como “vector de diseño”, y es el que define como será la posible solución (W. Erwin Diewert, 2008).

Existen diferentes tipos de solución:

- Binaria.
- Entera.
- Continua o Real.
- Híbrida.
- De permutación.

Asimismo, existen diferentes tipos de funciones objetivo, de acuerdo con el tipo de variable, formulación matemática y operatividad. Entre las más importantes, se tiene:

- Lineal y No Lineal.
- Unimodal y Multimodal.
- Estática y Dinámica.
- Sin Ruido y Con Ruido.
- Un objetivo y Multiobjetivo.

Sea cual sea el método y función de optimización escogido, este tiene que tener la capacidad de representar la totalidad de las soluciones, debe existir una ruta entre dos conexiones en el espacio y además la representación debe ser fácilmente operada, es decir, el método debe ser eficiente.

3.1.2.3. Restricción.

Una restricción es un parámetro que permite ceñir, circunscribir o reducir a un límite un elemento determinado, de modo que haya validez en el diseño. Estas restricciones o limitaciones pueden ser impuestas directamente por una o varias variables (restricción explícita), o puede ser impuesta por un fenómeno que no tiene relación directa con las variables de diseño (restricción implícita) (Cerroloza y Annicchiarico, 1996). Dado que estas restricciones son aplicadas en problemas de tipo físico y matemático, se pueden clasificar en dos grandes grupos:

- Funcionales: Se refieren al comportamiento físico-mecánico el sistema.
- Geométricas: Se refieren a las dimensiones y tipología de los elementos.

En el ámbito estructural, las restricciones se refieren al comportamiento de la estructura y su estabilidad, y se imponen generalmente a los esfuerzos y deformaciones en los elementos y por ende a sus dimensiones mínimas y máximas. Además, deben imponerse restricciones constructivas para que los elementos obtenidos tengan una secuencia y configuración lógica y factible de ser llevada a cabo en la realidad (Geem, 2009).

3.1.2.4. *metodología para formular y resolver un problema de optimización.*

La formulación del problema de optimización estructural es donde se definen las variables, la o las funciones objetivo y las restricciones, por lo que una correcta formulación es esencial para obtener resultados satisfactorios (Negrín Montecelo 2010).

Para dar solución a un problema de optimización en general, es recomendable seguir la metodología que se muestran a continuación (Negrín Montecelo, 1988b)

- a) Selección del Criterio de Optimización.
- b) Elaboración de la Función Objetivo
- c) Definición de los Parámetros Variables.
 - Variables de Diseño.
 - Parámetros Asignados.
- d) Definición de las Restricciones.
 - Restricciones de diseño.
 - Restricciones de comportamiento.
- e) Selección del Método Matemático de Solución.
- f) Solución del problema de optimización.
- g) Análisis de sensibilidad.

3.1.2.4.1. *Diseño Óptimo*

La formulación general del diseño óptimo es la descripción matemática de todo el proceso que se ejecuta para argumentar cuantitativamente cuál es la mejor de las posibles soluciones que puede tener un problema, que se concreta en la determinación de las magnitudes de los parámetros variables.

Del ingeniero depende la elección de los requerimientos propios de dicho proceso, al cual se le conoce como modelo matemático y cuyas características están definidas por los parámetros variables, las restricciones, y función objetivo (MENESES, 1997; Negrín Montecelo, 1988b).

3.1.2.4.2. *criterios de optimización.*

Es aquello que se desea optimizar desde uno u otro punto de vista. Un problema de optimización trata entonces de tomar una decisión óptima para maximizar (ganancias, eficiencia, etc.) o minimizar un criterio determinado (costos, tiempo, riesgo, error, etc.).

En la ingeniería estructural se puede minimizar el costo total de una estructura o de un elemento independiente, buscar su mínimo peso o su mejor estructuración. Siendo para el caso de las estructuras aporticadas el criterio de mínima sección transversal.

3.1.2.4.3. *modelo matemático*

El modelo matemático corresponde a un problema de optimización dado por:

Minimizar $f_{(x)}$ sujeta a $h_{(x)} = 0$, $g_{(x)} \leq 0$, donde “f” es una función de valor real que depende de la variable “x”, que a su vez, es un conjunto de varias variables x_1, x_2, \dots, x_n ; las funciones “h” y “g” son funciones que dependen también de las varias variables x_1, x_2, \dots, x_n , y sus imágenes son conjuntos de funciones h_1, h_2, \dots, h_m , y g_1, g_2, \dots, g_r , respectivamente, las cuales asumen un valor real. Las funciones “h” y “g” determinan una región “S” del espacio que se denomina región factible del problema (vea Figura 1, en la que se consideran regiones factibles en el plano, es decir, el caso en el que el número de variables del problema es 2, digamos x_1 y x_2).

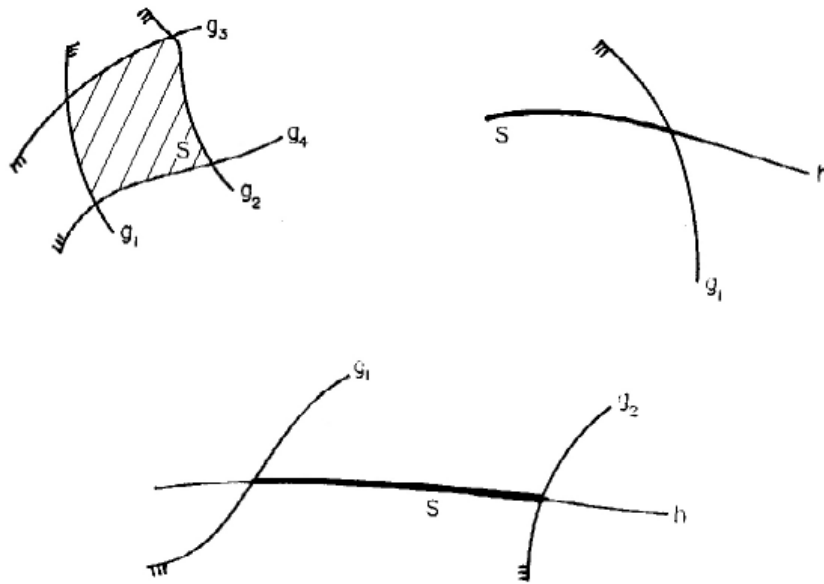


Figura 3.1, Regiones factibles en el plano, Tomada de Elementos de programacao nao-linear, Ana Friendlander, Ed: Unicamp, 1994

que es aquella que contiene todos los posibles valores que pueden asumir las variables, de forma que satisfagan tanto las restricciones de igualdad como de desigualdad. Cuando las variables asumen valores en esta región, decimos que estamos frente a una solución factible. Ahora bien, una solución factible x^* que minimice la función objetivo es llamada solución óptima; esto es, $f(x^*)$ que es el menor valor que toma la función objetivo.

La teoría que lleva al desarrollo de los métodos de solución tiene que ver con el estudio de condiciones necesarias y suficientes, de optimalidad de la función $f(x)$ dadas las restricciones del problema; sin embargo, no es pertinente aquí la presentación de la misma debido al enfoque de este trabajo. Nos limitaremos simplemente a establecer concretamente el modelo de nuestro problema, con la definición correspondiente de variables, función objetivo y restricciones; asimismo, la solución de tal modelo estará basada en el uso de comandos o funciones del

lenguaje computacional MATLAB, los cuales traen inmersos la implementación de los algoritmos que resuelven este tipo de problemas. Estos algoritmos se obtienen básicamente de tres categorías de métodos: Penalización y barrera, Programación cuadrática secuencial, y Gradiente reducido generalizado (Friedlander, 1994).

3.1.3. Fundamentos del método matricial de rigidez.

El método matricial de rigideces es conocido de este modo, debido a que básicamente se fundamenta en la relación de las fuerzas y los desplazamientos de los elementos de una estructura cualquiera, mediante las matrices de rigidez.

Partiendo de las relaciones de rigidez entre fuerzas y desplazamientos, es posible plantear ciertas ecuaciones con el mismo fundamento, generadas aplicando las ecuaciones de movimiento y las ecuaciones constitutivas de los materiales. De esta manera, se obtiene un sistema con un número n de ecuaciones con n grados de libertad. Resolviendo este sistema para los desplazamientos de la estructura, es posible sustituir dichos desplazamientos conocidos en las ecuaciones matriciales de rigidez para hallar las fuerzas en los elementos.

Para la formulación de las ecuaciones del método, se parte de las siguientes hipótesis:

- El comportamiento es elástico, lineal, homogéneo e isotrópico.
- Desplazamientos Infinitesimales.
- Cada punto del cuerpo tiene masa (continuidad).
- Todo el cuerpo al ser cargado tiene un régimen interno de tensiones.
- El comportamiento es adiabático. (no intercambia calor con su entorno.)

Un paso fundamental en la aplicación del método consiste en dividir a la estructura en segmentos más pequeños que deben cumplir con la condición de tener geometría simple, cuyas relaciones entre desplazamientos en sus extremos y las fuerzas inducidas sea conocida.

De la teoría de la resistencia de materiales se obtienen los modelos matemáticos que nos permiten predecir los esfuerzos y deformaciones en barras rectas.

La matriz de rigidez de un elemento tipo pórtico se representa en la siguiente figura:

		U1	U2	U3	U4	U5	U6	
	U1	AE/L	0	0	-AE/L	0	0	
	U2	0	$12EI/L^3$	$6EI/L^2$	0	$-12EI/L^3$	$6EI/L^2$	
k=	U3	0	$6EI/L^2$	$4EI/L$	0	$-6EI/L^2$	$2EI/L$	
	U4	-AE/L	0	0	AE/L	0	0	
	U5	0	$-12EI/L^3$	$-6EI/L^2$	0	$12EI/L^3$	$-6EI/L^2$	
	U6	0	$6EI/L^2$	$2EI/L$	0	$-6EI/L^2$	$4EI/L$	

Figura 3.2, matriz de rigidez de un elemento tipo pórtico, elaboración propia

Y se le conoce como matriz de rigidez local; en cada elemento de la estructura definiremos un sistema local, al que referiremos los movimientos y fuerzas de cada barra.

La matriz de rigidez de toda la estructura será en las coordenadas globales establecidas X, Y, y Z, por lo tanto, es necesario rotar el sistema coordenado local de cada elemento al global. Para este fin, se dará uso de la matriz de transformación de coordenadas obtenida de la siguiente figura:

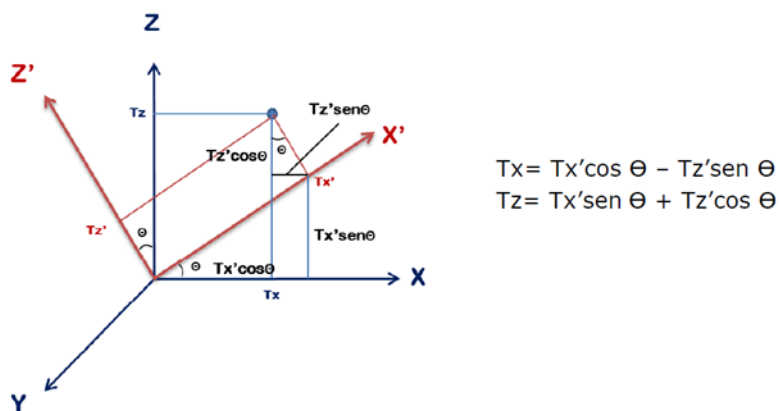


Figura 3.3, Análisis matricial de estructuras por el método de la rigidez (Novely Cabrales, 2015).

Por lo tanto, la matriz de rotación con los 6 grados de libertad para un elemento tipo pórtico mostrado en la Figura anterior, será:

		1	2	3	4	5	6
T=	1	$\cos \theta$	$\sin \theta$	0	0	0	0
	2	$-\sin \theta$	$\cos \theta$	0	0	0	0
	3	0	0	1	0	0	0
	4	0	0	0	$\cos \theta$	$\sin \theta$	0
	5	0	0	0	$-\sin \theta$	$\cos \theta$	0
	6	0	0	0	0	0	1

Figura 3.4, matriz de rotación con 6 grados de libertad, elaboración propia

Puesto que, en el proceso de discretización de la estructura, se ha supuesto que está formada por un conjunto de elementos y nodos, será preciso definir un sistema único, global, que permita referir a él de forma única y para toda la estructura los movimientos y fuerzas de los nodos.

Para los elementos tipo viga la matriz de rigidez local coincidirá siempre con la global ya que este tipo de elementos por lo general no tienen inclinación, es decir el ángulo α será igual a 0 por lo tanto no será necesario aplicar la matriz de transformación de coordenadas. Así, la matriz global de los elementos de un pórtico está dada por:

$$K_{global} = [T'] * [K_{local}] * [T]$$

$[T]$: es la matriz de rotación del sistema

$[T']$: es la transpuesta de T

K_{global} : es la matriz de rigidez local del elemento

	K11	K12	K13	K14	K15	K16
	K21	K22	K23	K24	K25	K26
K_{global}	K31	K32	K33	K34	K35	K36
	K41	K42	K43	K44	K45	K46
	K51	K52	K53	K54	K55	K56
	K61	K62	K63	K64	K65	K66

Figura 3.5, matriz global de la estructura, elaboración propia.

Para obtener la matriz de rigidez de toda la estructura se suma la rigidez que aporta cada elemento; al final la matriz será cuadrada y simétrica del tamaño de los grados de libertad establecidos en la numeración dada a cada nudo basado en sus grados de libertad.

Para el cálculo de los desplazamientos (U), se sabe que la rigidez (K) es la relación entre una fuerza (F) y el desplazamiento elástico (U) que produce.

$$[K] = \frac{\{F\}}{\{U\}} \Rightarrow \{U\} = [K^{-1}] * \{F\} \rightarrow \{F\} = [K] * \{U\}$$

	F1		K11	K12	K13	K14	K15	K16		U1	
	F2		K21	K22	K23	K24	K25	K26		U2	
	F3	=	K31	K32	K33	K34	K35	K36	*	U3	
	F4		K41	K42	K43	K44	K45	K46		U4	
	F5		K51	K52	K53	K54	K55	K56		U5	
	F6		K61	K62	K63	K64	K65	K66		U6	

Figura 3.6, relación entre la matriz de rigidez y el desplazamiento elástico, elaboración propia

3.1.4. Consideraciones en el análisis sísmoresistente.

Aunque las agitaciones sísmicas como terremotos no se puedan prevenir en la práctica, la ciencia y la ingeniería proporcionan las herramientas que se pueden utilizar para reducir sus efectos absolutamente substancialmente. En primer lugar, la ciencia puede ahora identificar donde y cuando los terremotos son probables a ocurrir, en qué magnitud. Esta información es fácilmente disponible a los arquitectos, ingenieros, escritores del código, planificadores y al público en general. En segundo lugar, los investigadores sísmicos y los ingenieros estructurales con experiencia en diseño sísmico tienen suficiente comprensión de los efectos del sismo que hacen vibrar a los edificios, para con estos datos lograr hacer los diseños que serán seguros para las diferentes intensidades de los sismos.

Los códigos técnicos de construcción sísmoresistente modernos, incorporan toda esta información y requieren que las estructuras tengan diseños de ingeniería estructurales apropiados para cada región. (Acosta G, de la Cruz, Nina S, & Fernández, n.d.)

El Análisis Estructural es una rama antigua de la Ingeniería Civil, podemos decir que es la responsable del diseño, planeamiento y cálculo de la parte estructural, (que forma un sistema integrado de vigas, columnas, losas, muros, presas, túneles, zapatas de cimentación y otros), que lo empleamos en los edificios urbanos, construcciones industriales, puentes, estructuras de

desarrollo hidráulico y demás obras. Su propósito es la de obtener estructuras eficaces que resulten apropiadas a partir del punto de vista sismoresistente.

En un sentido práctico, la ingeniería estructural es la aplicación de la mecánica Newtoniana para el diseño de elementos y sistemas estructurales, en los que mayormente se necesita resolver problemas de alta complicación, que se solucionan mediante técnicas de cálculo diferencial e integral de diversas variables, temas de álgebra lineal, ecuaciones diferenciales y métodos numéricos.

El procedimiento basado en desplazamiento directo se deriva en gran medida del método de la estructura substituta desarrollado por Sozen (1974), para modelar un sistema inelástico con propiedades elásticas equivalentes. Con este enfoque se busca proveer al miembro de las características apropiadas, en cuanto a tamaño de la sección y cantidad de refuerzo y detallado, para desarrollar un desplazamiento predeterminado para el sismo de diseño. Dentro de este procedimiento, generalmente se diseña para un comportamiento asociado a la respuesta última, por lo que se selecciona un desplazamiento objetivo.

3.1.5. Método de la fuerza horizontal equivalente

El Reglamento colombiano de construcción sismo resistente (NSR-10), en su sección A.3.4.2.1, exige que el método de fuerza horizontal equivalente se debe utilizar en las edificaciones que cumplan las siguientes características:

- a)** Todas las edificaciones, regulares e irregulares, en la zona de amenaza sísmica baja.
- b)** Todas las edificaciones, regulares e irregulares, pertenecientes al grupo de uso I, localizadas en zona de amenaza sísmica intermedia.

- c) Edificios regulares, de veinte niveles o menos, y 60 m de altura, o menos, medidos desde la base, en cualquier zona de amenaza sísmica, excepto las edificaciones localizadas en lugares que tengan un perfil de tipo D, E o F con periodo de vibración mayor de $2T_c$.
- d) Edificaciones irregulares que no tengan más de 6 niveles o 18 m de altura medidos desde la base.
- e) Estructuras flexibles apoyadas sobre estructuras más rígidas que cumplan los requisitos de la NSR-10 sec. A.3.4.2.3.

El sistema de la fuerza horizontal equivalente **FHE**, es utilizado para evaluar las fuerzas sísmicas de diseño y consiste en reemplazar las fuerzas del sismo por fuerzas laterales **F_x**, que son aplicadas a nivel de piso, equilibrando el cortante de base. Para la determinación de este método se seguirán los siguientes pasos:

- a) Evaluación de la masa
- b) Calculo del periodo fundamental de la estructura **T_a**
- c) Calculo del espectro de diseño **S_a**
- d) Obtener el peso y avalúo de cargas del edificio
- e) Determinación del cortante de base **V_s**
- f) Aplicación de las fuerzas sísmicas para cada nivel del edificio
- g) Determinar los valores de distribución vertical **C_v** para cada nivel
- h) Calcular las fuerzas horizontales que actúan en cada piso **F_x**
- i) Calcular la distribución del cortante en la base **V_x**
- j) Calculo de los desplazamientos Δ
- k) Verificación del periodo de vibración **T**
- l) Calculo, control y chequeo de derivas

3.2. Estado del Arte

En relación con la optimización de las estructuras, si bien la información más antigua se remonta al siglo XV con los trabajos de Leonardo da Vinci y de Galileo Galilei sobre la disminución del peso de estructuras de madera, hay que esperar al siglo XIX con Maxwell y Levy, y a comienzos del siglo XX con Mitchell, para ver las primeras aportaciones en el diseño de mínimo peso de estructuras de arcos y cerchas metálicas (Ivan Antonio Negrin Diaz, 2016).

En los trabajos de Negrín Montecelo (1988a) y Castellanos (2000) se enuncia que la historia de la optimización, como la de todas las ciencias, ha estado marcada por una serie de grandes aportes los cuales en sus respectivos momentos cambiaron, o al menos alteraron, la forma de pensar y de resolver los problemas hasta esos momentos por parte de la comunidad técnica y científica. Todos estos aportes además de lograr transformaciones provocaron la aparición y posterior desarrollo de nuevas líneas y tendencias en el trabajo investigativo.

Según Hernández (1991), Castellanos (2000) y Negrín Montecelo (2005), es realmente difícil precisar el momento exacto en que surge el concepto de optimización en el ámbito del diseño en general, por esa misma razón es que se hace prácticamente imposible fijar la fecha del momento exacto en el que se emplea por primera vez dicho concepto en el diseño estructural, entendido éste en el sentido amplio de buscar la solución estructural más deseada desde cualquier punto de vista, ya sea económico, de utilidad, etcétera.

De forma general, los métodos de optimización que surgieron a raíz de esta época pueden dividirse, para su mejor estudio y comprensión, en tres grupos principales (Castellanos, 2000):

- Las técnicas de solución de los problemas de minimización restringida.
- El planteamiento de modelos de optimización estructural.
- Otras técnicas asociadas a la optimización estructural

Según Negrín (2009) entre los métodos creados en esta etapa se deben destacar los siguientes:

- Métodos de búsqueda directa.
- Métodos del gradiente.
- Métodos de función penalty.
- Métodos de secuencia de problemas lineales.

Por otro lado, el grupo de investigación de la universidad Politécnica de Valencia, a través de su proyecto de investigación HORSOST, ha presentado trabajos recientes de diseño automático y optimización de estructuras de hormigón armado con algoritmos genéticos (F.J. Martinez, F. González-Vidoso, A. Hospitaler, 2007) y con otras técnicas heurísticas, así como trabajos de optimización con hormigón pretensado.

Martínez (2012), plantea en su tesis doctoral, una metodología que encara una optimización general del peso de las estructuras de transporte de energía, considerando la diferente naturaleza de las variables que caracterizan el problema.

En este sentido, el algoritmo propuesto compatibiliza la naturaleza discreta de las secciones de las barras, con la naturaleza continua de las variables que dependen la geometría y forma global de la estructura.

Esta metodología se basa en la algorítmica del Recocido Simulado, enunciada por Kirkpatrick a principios de los años '80. De este modo a partir de un proceso estocástico de pruebas basado en la analogía del templado de los metales se mapea el entorno de posibles soluciones. El método enunciado por Kirkpatrick permite adoptar soluciones que pueden empeorar la función objetivo, siempre y cuando estas redunden en una mejor exploración del

entorno factible y posibiliten una mejora al de la solución obtenida. De este modo se consigue una metodológica capaz de optimizar la solución a un problema discreto o mixto, evitando posibles explosiones combinatorias.

Sánchez (2012) plantea una solución a un problema de optimización de cimientos, utilizando varios tipos de suelo.

Gutiérrez-Astudillo et al. (2012) proponen un algoritmo genético con “cruzamiento natural” el cual se aplica sobre una representación continua-discreta con el fin de optimizar armaduras. El objetivo es disminuir el peso restringiendo los desplazamientos de los nodos y limitando los tipos de perfiles estructurales a usar. Las soluciones se combinan con dos tipos de cruzamientos en la misma representación, que permiten explorar de una manera efectiva el espacio de búsqueda. Los resultados se validan comparando los encontrados en este trabajo contra los de la literatura, para el caso del diseño de la armadura de un puente de 70 m de claro se obtienen soluciones más ligeras y con diferente topología. Adicionalmente se propone un caso de estudio, el diseño de la techumbre de un invernadero, que después se construye a escala real y se somete a cargas para verificar su resistencia.

Otra forma de optimizar estructuras en cuanto a su geometría, es la de utilizar concretos de mejor calidad y menos pesado, con los cuales se pueden llegar a diseñar estructuras más livianas y por ende lograr optimizar las secciones de los elementos estructurales (Sabău, Cantillo Mier, & Oneț, 2016; Sabău, Pop, & Oneț, 2016; Sabău & Vargas, 2018).

Valencia (2012), presenta un trabajo donde hace una revisión de la técnica de optimización topológica (OT) aplicada al diseño de estructuras de peso reducido. El problema consiste en encontrar la topología que tenga la mayor rigidez con una restricción en el volumen final del material, partiendo de un dominio bidimensional rectangular con las restricciones y cargas

correspondientes. El trabajo se divide en tres partes generales: revisión del estado del arte, implementación de un código en Matlab y reproducción de los resultados reportados en la literatura, y aplicación de la técnica al diseño de una pieza mecánica de peso reducido.

El objetivo fundamental del trabajo de Caballero (2012) es definir de un algoritmo que no parte de una estructura predefinida y que incorpora los parámetros que determinan la geometría. A diferencia de los métodos actuales, el algoritmo desarrollado no requiere ningún tipo de estructura inicial ni otro tipo de información adicional, aparte de la definición de los puntos de aplicación de las cargas, los puntos de apoyo y el tipo de apoyo.

París et al. (2012), propone una metodología de diseño óptimo de estructuras orientado a la resolución de problemas de optimización de formas y dimensiones. Las formulaciones más habituales de estos planteamientos pretenden obtener una solución que maximice la rigidez de la estructura dadas unas limitaciones en la cantidad de material a utilizar. En este artículo se propone una formulación diferente a la de máxima rigidez para el problema de optimización topológica de estructuras que minimiza el peso e incorpora restricciones en tensión. Además, esta formulación permite evitar algunos de los problemas e inestabilidades numéricas que presentan las formulaciones de máxima rigidez.

Brea (2013), en su artículo, presenta un algoritmo nuevo basado en una extensión del método algorítmico simplex de Nelder Mead para la identificación de al menos un óptimo local cuando se usa en problemas no lineales enteros mixtos irrestrictos. Este método algorítmico, denominado Algoritmo Simplex Entero Mixto (ASEM) por el autor, se basa en una doble estructura de simplex que está compuesta por una estructura simplex real de dimensión n (simplex real) y otra estructura simplex entera de igual dimensión n (simplex entero).

Vieira & Silva (2013) en su trabajo presenta la formulación para obtener superficies y sus aplicaciones en el análisis de estructuras elastoplásticas de pórticos espaciales. Explica que los criterios de estado límite últimos (superficies de interacción) aplicados a los diseños estructurales son más útiles cuando son el resultado de tensiones. El enfoque en la literatura para el análisis no lineal de estructuras con vigas 3D es el uso de superficies de interacción con sólo 3 tensiones combinadas en la sección transversal. Por lo tanto, se requiere una mejor comprensión del tipo de carga, las interacciones entre los esfuerzos y la estabilidad global y local de la estructura. Las superficies de interacción de tres vías se presentan en formas planas, cuadráticas, complejas o mixtas, de modo que las técnicas que utilizan formulaciones analíticas con esfuerzos combinados y varias formas de secciones son más o menos complejas. El modelo de regresión lineal múltiple permite tratar esfuerzos resultantes de varios análisis para obtener una superficie de escorrentía con esfuerzos combinados.

En la tesis de Maestría presentada por Negrín (2010) se observan los logros obtenidos al optimizar todos los elementos de un pórticos de hormigón armado (vigas, columnas y cimientos), entre los cuales se destacan: En las vigas el rango de pareto económico puede estar entre $L/10$ y $L/8$, dentro de las variables que influyen en el proceso de optimización de conjuntos estructurales, influye en mayor medida la profundidad de cimentación, el peralte de las columnas, la rectangularidad de la base de la cimentación y el peralte de las vigas, y en menor medida la calidad del hormigón.

Pallares M et al. (2014) en su artículo sobre optimización del diseño de armaduras de dice que las estructuras formadas por elementos lineales articulados constituyen una tipología importante de los sistemas estructurales que se utilizan en ingeniería y por ello resultan un campo muy interesante para la aplicación de los métodos de optimización. La optimización de

estas estructuras se refiere a las dimensiones de las secciones transversales de las barras, y, a la posición de los nudos, teniendo en cuenta las restricciones que el pandeo introduce sobre las barras solicitadas a compresión, que se traducen en límites de tamaños para las secciones transversales para evitar la disminución de capacidad resistente. Y se determinan secciones optimizadas de elementos articulados identificando la función objetivo a minimizar, las variables de diseño y las restricciones del problema.

Martínez-Frutos et al. (2014) propone una metodología basada en modelos Kriging, para resolver de forma eficiente el problema de cuantificación de incertidumbre en el proceso de optimización. Para hacer frente a este problema, en este artículo el modelo Kriging se aproxima de forma simultánea a la respuesta estructural en el dominio de diseño y en el dominio estocástico, permitiendo desacoplar los procesos de cuantificación de incertidumbre y de optimización. Se han resuelto 3 problemas para mostrar la aplicabilidad y la precisión de la metodología propuesta. Los resultados muestran que la metodología es adecuada para resolver el problema de diseño óptimo robusto con una precisión razonable y un número de evaluaciones del modelo de simulación muy inferior al que requieren los métodos convencionales.

Sebastián (2014), propone un algoritmo genético multi-cromosoma paralelo para resolver el problema de optimización de armaduras de acero 3-D, desarrollado en la plataforma JAVA®, el cual utilizó un cromosoma binario para determinar el mejor conjunto de perfiles y un cromosoma real para auto-adaptar los parámetros genéticos durante la optimización. Para el diseño de las armaduras se empleó un programa de elementos finitos desarrollado en MatLab®.

Lapadula (2014) presenta la comparación de las técnicas SQP (Sequential Quadratic Programming) y PSO (Particle Swarm optimization) al ser aplicadas al problema de optimización de pórticos planos de concreto armado. El SQP y el PSO son algoritmos de

optimización provenientes de filosofías diferentes. El primero es una técnica clásica basada en cálculo diferencial, mientras que el segundo es una metaheurística inspirada en comportamientos observados en la naturaleza. Como función objetivo de la optimización se utilizó el costo inicial de construcción del pórtico.

Señís (2014), tiene como objetivo fundamental en su tesis, el de establecer un procedimiento para la optimización de mallas estructurales de acero y envolventes de edificios en altura, como tipología estructural de entramado en tubo. Para ello, se realiza un estudio comparativo estructural, de acuerdo con el análisis de las direcciones de las tensiones principales, para determinar si las mallas espaciales analizadas son más óptimas y eficientes cuando su diseño se adapta, o asemeja, a la trayectoria de las líneas isostáticas de los elementos estructurales equivalentes de alma llena, bajo las acciones solicitantes que deben resistir, a la vez que se atiende a las cuestiones arquitectónicas del proyecto.

Simonetti et. al (2014), explica en su trabajo, que los problemas de optimización topológica basados en criterios de tensión se resuelven utilizando dos técnicas. La primera técnica es la Optimización Estructural Evolutiva convencional (ESO), que se conoce como Dura, porque el material se retira discretamente; es decir, los elementos bajo tensión que están siendo ineficientemente utilizados tienen su matriz constitutiva que se ha reducido súbitamente. La segunda técnica propuesta en un artículo anterior es una variante del procedimiento de ESO y se llama Smooth ESO (SESO), que es basado en la filosofía de que, si un elemento no es realmente necesario para la estructura, su contribución a la rigidez estructural disminuirá gradualmente hasta que ya no influya en la estructura; su eliminación se realiza así suavemente.

Millán et al. (2014) proponen y validan para la solución de problemas de optimización un algoritmo metaheurístico basado en imitar procesos naturales, biológicos, sociales o culturales.

Nadal et al. (2014) centran su investigación en la mejora del rendimiento del nivel inferior mediante una metodología que usa un código con el método de elementos finitos (MEF), los resultados numéricos, que incluyen una comparativa con un software comercial, muestran el efecto de la metodología propuesta sobre la mejora de la eficiencia de la optimización y de la calidad de la solución. Las técnicas de reconstrucción juegan un doble papel: a) su uso en estimadores de error del tipo Zienkiewicz-Zhu permite cuantificar la calidad de la solución MEF para poder guiar el proceso de refinamiento h-adaptativo conducente a minimizar el coste computacional para una precisión dada, b) proporcionan una solución, que puede ser utilizada en la práctica, más precisa que la del MEF.

Hernández et al. (2014) en su trabajo describe brevemente el debate científico que se produjo en su momento en el ámbito de la optimización de estructuras entre los partidarios de los métodos matemáticos de optimización de problemas no lineales y los de los criterios optimizantes. Tras revisar el estado del arte, se ha desarrollado una nueva formulación que simplifica y mejora las anteriores y transforma el problema de optimización en otro consistente en resolver sucesivamente sistemas de ecuaciones de la misma dimensión que el número de variables del problema. El algoritmo requiere la obtención de las sensibilidades de primer orden, con lo que también puede ser considerado como un nuevo método de gradiente.

Jiménez et. al (2014) en su trabajo propone una discusión sobre el artículo de Bezerra et al. (2014). El principal punto que hay que tratar es la definición de los modelos T-equivalente (T-stub). También se han revisado las referencias bibliográficas existentes hasta el momento, así como el procedimiento seguido para el modelado de los componentes.

Luchi et al. (2015) presenta un nuevo enfoque para resolver problemas de optimización de números enteros no lineales restringidos, basados en la evolución diferencial (DE) y Nelder -

Mead (NM). DE es una técnica prometedora utilizada en problemas no diferenciables y no lineales con variables. Se utiliza para identificar regiones prometedoras en el espacio de búsqueda. NM es una técnica libre de derivadas utilizada en sistemas no lineales y problemas de optimización continua. Puesto que nos ocupamos de problemas enteros, entonces el NM se extiende para manejar con problemas de optimización de números enteros.

Uarac et al. (2015) en su trabajo presenta la optimización topológica de estructuras bidimensionales en estado de tensión plana, considerando un esquema de optimización bidireccional que incorpora un parámetro de penalización para maximizar la rigidez de la estructura considerando restricciones del tipo cinemático. Un código abierto de optimización topológica escrito en MATLAB® con capacidades de encontrar el óptimo para una fracción de volumen definida a priori, se modifica para obtener la estructura óptima cuando se impone un desplazamiento límite o admisible. La relevancia del presente trabajo radica en que permite visualizar la existencia de configuraciones de máxima rigidez dependiendo del desplazamiento límite o admisible elegido y como este converge hacia una estructura con tensiones uniformes.

Meza et al. (2015) en su trabajo presenta una implementación de la técnica de optimización topológica (OT) aplicada al diseño de elementos estructurales mecánicos de peso reducido. La OT es un método numérico que ha captado el interés de ingenieros y científicos en los últimos años, pues permite la síntesis de estructuras con valores óptimos de uno o varios de sus parámetros físicos. El problema de máxima rigidez con restricción de volumen consiste en encontrar la distribución de material en un dominio donde se tenga dicha máxima rigidez, para determinada carga aplicada, restringiendo el volumen final del material usado en la estructura. Fue implementado un algoritmo de solución usando elementos finitos planos de cuatro nodos e

interpolación lineal para la discretización del dominio y programación lineal secuencial para la solución del problema de optimización no lineal y multivariado.

Li et al. (2015) propone en su trabajo una aproximación cuadrática adaptativa (AQA) la cual propone para mejorar la robustez y el rendimiento de convergencia del proceso de optimización. Los resultados numéricos sobre problemas representativos de optimización estructural y topológica muestran la eficiencia del nuevo método propuesto sobre otros algoritmos existentes.

Tsavidaridis et al. (2015) centra su trabajo en la aplicación de la técnica de optimización de topología estructural para diseñar acero perforado en secciones-I como un primer intento para reemplazar las tradicionales vigas celulares y comprender mejor los mecanismos implicados cuando se someten a acciones de flexión y de cizallamiento. Se sigue empleando un análisis FE para determinar el rendimiento del has optimizado en comparación con el convencional ampliamente utilizado de tipo celular. Se observa que el has optimizado supera en rendimiento en términos de capacidad de carga, deformaciones e intensidades de tensión. Obstáculos a la implementación de la optimización de topología.

Millán et al. (2016) en su trabajo propone el empleo de la técnica estocástica de optimización ASAM para sustituir el criterio de optimalidad utilizado dentro del método de optimización topológica propuesto por Andreassen. Para evaluar y validar el desempeño de las técnicas planteadas, se abordaron 3 problemas de elasticidad plana reportados en la literatura especializada. Cada problema fue analizado empleando el método de elementos finitos (MEF) con 3 tipos de mallas diferentes, con el fin de comparar los resultados obtenidos en cuanto a topologías, valor de energía de deformación y tiempos de ejecución promedio. Se logró establecer que el procedimiento que involucra a ASAM arroja menores tiempos computacionales

a medida que se analizan los problemas con mallas más refinadas. Finalmente, las distribuciones de material en el dominio de diseño y valores de energía obtenidos fueron similares a los reportados en el trabajo de Andreassen, dando validez a la propuesta aquí presentada.

Vargas et al. (2016) presenta un análisis del rendimiento de un algoritmo basado en XML basándose en cinco ejemplos multi-objetivos de problemas de optimización. Los resultados obtenidos se comparan con aquellos encontrados en los casos, mostrando el potencial del algoritmo. Los problemas de la optimización se ocupan de aumentar el rendimiento de la estructura y reducir los costos mientras se cumplen los requisitos de seguridad. Debido a la naturaleza conflictiva de estos aspectos, la formulación de una optimización de los problemas de la multi-objetivo es a menudo el problema natural, y tiene la ventaja de presentar a diversas definiciones de soluciones a las decisiones, que son eficaces en soluciones de solución para varios problemas de optimización de fallos y que aquellos basados en la evolución (ED) son eficientes en la optimización de los problemas de la solución, especialmente aquellos que utilizan la codificación real en sus variables de diseño.

Ullah et al. (2015) presenta una aproximación de optimización estructural basada un método estructural que está representado de forma implícita, el cual tiene un modelo estructural inicial para llevar a cabo una configuración de optimación estructural estratégica.

Couceiro (2016) presenta una metodología para la optimización de estructuras tridimensionales y su Aplicación a soportes de líneas de transmisión de energía. A tal efecto, una versión modificada Se desarrolla el algoritmo Simulated Annealing. La validez del enfoque propuesto se basa en la y características constructivas de las estructuras consideradas en este estudio. Un análisis de sensibilidad de primer orden es Implementado para mejorar el rendimiento del algoritmo y evitar el cálculo de los grandes Número de análisis estructurales

usualmente requeridos por el algoritmo Simulated Annealing. El nuevo algoritmo SA se aplica con éxito en dos problemas clásicos de referencia y en un verdadero problema de diseño a gran escala.

Madsen et al. (2016) propone la optimización topológica aplicada en un modelo estructural idealizado de seguridad contra incendios, donde el cumplimiento mínimo del problema está limitado por la degradación estructural controlada por temperatura. La restricción garantiza una cierta rigidez estructural después de un tiempo prescrito. A medida que este período de tiempo se amplía, el resultando de la optimización topológica tiende a volverse más gruesa e introducir miembros redundantes que pueden asumir el control cuando las estructuras y las partes cercanas al origen del incendio pierden su capacidad de carga. Por lo tanto, la degradación estructural del modelo actúa como operador de erosión en la topología e impone indirectamente una escala de longitud los diseños finales.

Brown et al. (2016) en su artículo aborda el potencial de la optimización multi objetivo (MOO) en el diseño conceptual para ayudar a los diseñadores a generar y seleccionar soluciones a partir de una gama geoméricamente diversa de formas constructivas de alto rendimiento. Con un enfoque en la tipología de construcción de largo alcance, esta investigación emplea un enfoque MOO que utiliza tanto el modelado estructural de elementos finitos como la construcción de simulaciones de energía simultáneamente para generar formas de construcción optimizadas que no están limitadas a configuraciones geométricas regulares y rectilíneas. A través de una serie de estudios de casos que exploran los compromisos de rendimiento de los arcos cerrados y los volúmenes estáticos en diferentes climas, este documento muestra cómo MOO puede producir diseños arquitectónicamente expresivos y de alto rendimiento, lo que hace que el proceso sea más atractivo para los diseñadores buscando formas creativas. También

proporciona nuevas ideas en las respuestas de diseño específico a las diversas restricciones climáticas, ya que la optimización que considera tanto la estructura y la energía pueden cambiar las mejores soluciones de maneras inesperadas. Finalmente, al mostrar resultados de rendimiento en términos de energía incorporada y operativa, este documento presenta nuevos datos que muestran cómo las consideraciones de la eficiencia del material estructural se comparan en magnitud con el uso total de energía del edificio. En conjunto, estas tres contribuciones pueden influir en las estrategias actuales de diseño sostenible para la construcción de tipologías que tienen requisitos estructurales significativos.

An et al. (2016) en su trabajo aborda problemas de optimización estructural donde múltiples casos de estructura o múltiples casos de carga útil pueden ser considerados simultáneamente. Ambos tipos de problemas de optimización implican múltiples modelos de elementos finitos en cada paso de iteración, lo cual atrae altas demandas en métodos de optimización. Teniendo en cuenta la característica común de estos dos tipos de problemas, es que el dominio de diseño se mantiene igual sin importar cuáles sean los casos de estructura o casos de carga útil, ambos problemas pueden ser formulados en las expresiones unificadas. Una aproximación multipunto de dos niveles (TMA) se mejora en primer lugar con el uso de análisis de sensibilidad analítica para análisis estructural Masa, y luego este método mejorado se utiliza para abordar estos dos tipos de problemas.

Savsani (2017) en su trabajo investiga la optimización simultánea y la topología de los planos y las condiciones subjetivas de las restricciones tácticas y dinámicas. Todo el valor de referencia se basa en la consideración de los aspectos prácticos de la fabricación. Están sujetos a restricciones para las frecuencias naturales, las tensiones de los elementos, los desplazamientos,

los criterios de Euler buckling y las condiciones de estabilidad de la escritura la optimización de la topología

En este método, las dificultades surgieron en torno a la resolución y análisis innecesarios, por lo que se modifica resolver las dificultades. Las respuestas estáticas y dinámicas a los problemas de TTD plantean un espacio de búsqueda, que es implícita, no convexa, no lineal y a menudo llevando a la divergencia. La metaheurística modificada es un método de optimización eficaz para manejar estos problemas en un hecho real.

El objetivo del trabajo de Balogh et al. (2017) es investigar una nueva forma de evitar el desarrollo de patrones de tablero de ajedrez en la optimización de la topología estructural, utilizando una libertad rotacional adicional en el plano. La eficiencia de unos pocos, de las muchas formulaciones existentes, con complejidad diferente se comparan, como el elemento bilineal 4 estándar modificado, la solución de tipo Allman, el elemento de Shell de SAP2000 y finalmente un elemento construido sobre la base de la teoría micro polar. Dado que la aparición de regiones de tablero es un fenómeno general, el problema de optimización es lo más simple posible, siendo una minimización de peso con una restricción de cumplimiento, resuelta con el método de criterios de optimalidad y una discretización FEM del dominio de diseño.

Gentils et al. (2017) proponen un modelo integrado de optimización estructural, que optimiza Los componentes de la estructura de soporte (es decir, torre, pieza de transición, lechada y mono pila) simultáneamente.

Al contabilizar casi el 25% del costo de capital de una OWT (turbina eólica marina), la optimización del apoyo proporciona una manera eficaz de reducir el alto costo actual de la energía eólica marina. En este artículo, se ha desarrollado un modelo de optimización estructural para las estructuras de soporte de la OWT, por el método paramétrico FEA (Finite Element

Analysis) y GA (Algoritmo Genético), minimizando la masa de la estructura de apoyo bajo restricciones multi-criterios. Contrariamente a los modelos de optimización existentes para OWT y estructuras de apoyo.

Zhou et al. (2017) propone en su trabajo un modelo de optimización de estructuras existentes, colocando extensómetros para facilitar las aplicaciones prácticas evaluación del desempeño.

La evaluación del desempeño estructural es esencial para mantener la seguridad y la funcionalidad de los Infraestructuras civiles. Las mediciones de campo que proporcionan a los ingenieros información útil adecuada y es necesaria para monitorear y evaluar efectivamente el desempeño estructural. Además, la información sobre la tensión muestra generalmente una poderosa capacidad para detectar las variaciones de propiedades estructurales locales. Por lo tanto, los medidores de deformación se usan comúnmente para monitorear y probar el rendimiento estructural.

Zhang et al. (2017) presenta en su trabajo un modelo para acelerar el proceso de optimización con una formulación basado en la estructura del suelo, implementando un algoritmo evolutivo modificado y técnicas computacionales. A diferencia del trabajo anterior que se centra exclusivamente en el rendimiento estructural o diseño arquitectónico, esta investigación integra ambos, implementando una metodología eficiente de diseño computacional introduciendo la disposición de la pared de corte en el plano. El método minimiza el peso estructural con restricciones a la torsión, resistencia a la flexión, resistencia al corte, deriva aberturas y accesibilidad. Se puede aplicar desde el Mismo comienzo del diseño del plano en planta o después de generar un plano de planta arquitectónica. Este trabajo demuestra el potencial de este enfoque a través de una variedad de estudios de caso. Las contribuciones clave incluyen una

variedad de aplicaciones del método de estructura del suelo, un algoritmo evolutivo modificado rápido y robusto, y un sistema de cálculo automático simplificado para el diseño de hormigón armado.

Jahangiry et al. (2017) en su trabajo pretende utilizar el Análisis Isogeométrico (IGA) para la optimización de la topología estructural de un conjunto de niveles. El nivel establecido se parametriza mediante las funciones de base N-niform Rational B-Spline (NURBS) en una dimensión superior, así mismo se utilizan funciones de base para aproximar las deformaciones desconocidas. En esta investigación, se incluyen tres problemas de optimización, la minimización del cumplimiento medio, considerando una cantidad de material, minimización del peso para evitar la concentración local de tensiones, así como la minimización del peso y de la tensión de energía bajo estrictas limitaciones locales. Los análisis de sensibilidad para los problemas de optimización se realizan para obtener velocidad en los límites. Con el fin de mover los límites hacia el óptimo la Hamilton-Jacobi (H-J) la ecuación es Resuelto mediante el esquema de Euler hacia adelante.

Jiang et al. (2017) en su trabajo se explica La función de distancia firmada (SDF) da la distancia más corta de un punto dado al límite, y el signo indica si este punto está dentro o fuera del límite cerrado o región cerrada. La propiedad SDF es altamente preferida en el nivel clásico establecer métodos para mantener la estabilidad numérica durante el proceso de optimización de topología y proporcionar una métrica para la distancia Interpolación de diferentes propiedades materiales. En los métodos convencionales establecidos de nivel, una forma común de alcanzar un nivel establecido en una función con la propiedad de distancia firmada es implementar periódicamente el llamado esquema de reinicialización resolviendo una ecuación diferencial parcial de Hamilton-Jacobi. Sin embargo, dicho esquema de reinicialización se implementa fuera

del bucle de optimización con el proceso de optimización suspendido, lo que puede desplazar el resultado de optimización y traer problemas de convergencia. En este trabajo, un doble potencial bien funcional se emplea para la regularización a distancia dentro de la optimización de la topología de bucle, que puede hacer cumplir la propiedad de distancia firmada de la función de ajuste de nivel en una banda estrecha a lo largo de los límites de diseño mientras se mantiene el nivel establecido. Función plana en el área de descanso del dominio computacional. La técnica de parametrización basada en la función de base radial (RBF) Combinado con la programación matemática para mejorar el rendimiento de la propuesta de optimización de topología regularizada a distancia. En el manejo de problemas con funciones objetivas no convexas y múltiples restricciones. La planicidad de la función de ajuste de nivel.

Xiong et al. (2017) en su trabajo se aplica una optimización cuantitativa de una relación de Poisson negativa modificada (NPR). Se llevó a cabo utilizando el método de análisis de elementos finitos (FEA). Se calcularon las relaciones de Poisson de modelos con eslabones inclinados de diferentes ángulos de inclinación del puntal. El ángulo de inclinación simulado de los puntales era de 9° y el espesor del puntal era de 0,9 mm. La influencia de los radios del filete sobre la relación de Poisson y la concentración de tensiones. También se discutió y la relación de Poisson disminuyó y el fenómeno de concentración de esfuerzos en cierta medida con un aumento de los radios del filete.

Fernandes et al. (2017) en su trabajo se trata la Optimización Topológica (TO) de una estructura con comportamiento elástico-lineal considerando un objetivo multi-objetivo el cual es el objetivo de este trabajo. Para este proceso, se implementó una formulación heurística evolutiva denominada SESO (Smoothing Evolutionary Structural Optimization) junto con la aplicación del método de elementos finitos. Con el fin de encontrar la mejor topología, los

autores optan por utilizar la jerarquía analítica (AHP), que proporciona una metodología de criterios múltiples, pero teóricamente alternativas simple. Junto con el Método de la Suma Ponderada (WSM), que está considerando uno de los mejores y más sencillos análisis de decisión multicriterios o método de toma de decisiones multicriterios para evaluar una serie de alternativas en términos de una serie de criterios de decisión, este trabajo tiene como objetivo mostrar la mejor topología entre un proceso interactivo centrado en cuatro parámetros: volumen, desplazamiento, tensión e índice de rendimiento.

Capítulo 4

4.1. Diseño Metodológico

Para el presente proyecto de grado se utiliza una metodología de tipo cuantitativo.

A continuación, se describe de manera lógica y ordenada, la forma como se desarrollarán las fases del proyecto. Cada una de estas fases se compone de objetivos específicos y a su vez estos últimos se descomponen de actividades, también es posible apreciar el periodo de tiempo dentro del cual se desarrollará cada proceso.

4.1.1. Recopilación de Información y Definición del Método que se va a Utilizar

En esta fase se investigará toda la información concerniente al estado del arte en lo referente al tema de optimización estructural. Seguido se definirá el método que se utilizará para el análisis y diseño sismoresistente del modelo inicial a evaluar.

Objetivo: Recopilar la información necesaria, que sirva como input para el planteamiento del modelo matemático.

- **Actividades:**

- Definir el alcance del proyecto
- Investigar sobre el estado del arte, (artículos científicos relacionados con la optimización estructural, tesis a nivel de doctorado, y maestría)
- Definir el método que se utilizara para el análisis y diseño sismoresistente del modelo inicial a evaluar.

4.1.2. Modelo Diseño Estructural Inicial

En esta fase del proyecto, se dará inicio al análisis y diseño estructural y sismoresistente del modelo a evaluar, partiendo de un proyecto arquitectónico ya definido inicialmente; que, para nuestro caso, será de una edificación nueva estructurada en 2 niveles con una superestructura conformada por pórticos de concreto reforzado, resistentes a momento, destinado a uso residencial.

- **Objetivo:** Realizar el análisis estructural del pórtico A, por el método de la fuerza horizontal equivalente según la NSR-10, cuando la estructura está sometida a fuerzas horizontales debidas a cargas de sismo. Este análisis se realizará haciendo uso de una herramienta computacional, como lo es el software SAP2000.
- **Actividades:**
 - Definir el sistema estructural y estructuración
 - Evaluación de las solicitaciones definitivas, según el título B de la NSR-10.
 - Obtención del nivel de amenaza sísmica y los valores de A_a y A_v , F_a , F_v y coeficiente de importancia I , según el título A de la NSR-10.
 - Definir movimientos sísmicos de diseño, con base en el espectro elástico de diseño, y el periodo fundamental de la estructura.
 - Clasificar dentro de uno de los sistemas estructurales prescritos en el capítulo A.3 de la NSR.10, teniendo en cuenta las características de la estructuración y del material estructural empleado.
 - Definir el procedimiento de análisis sísmico de la estructura de acuerdo con la regularidad o irregularidad de la configuración de la edificación, tanto en planta como en alzado,

su grado de redundancia o de ausencia de ella en el sistema estructural de resistencia sísmica, según el capítulo A.3 de la NSR-10

- Obtención de las fuerzas sísmicas que deben aplicarse a la estructura. (Cálculo cortante basal V_s , y distribución de las fuerzas sísmicas F_x , a cada nivel de la estructura). según los movimientos sísmicos de diseño definidos.
- Realizar el análisis sísmico de la estructura, aplicando los movimientos sísmicos de diseño prescritos, a un modelo matemático apropiado de la estructura, según el capítulo A.3 de la NSR-10. (Cálculo de los desplazamientos horizontales).
- Evaluación de los desplazamientos horizontales, incluyendo los efectos torsionales de toda la estructura y las derivas (desplazamiento relativo entre niveles contiguos) según el capítulo A.6 de la NSR-10.

4.1.3. Formulación del Modelo Matemático

En esta etapa del proyecto se dará inicio a la estructuración del modelo matemático que se implementará en la optimización estructural.

- **Objetivo:** Desarrollar los procedimientos numéricos necesarios, que lleven al planteamiento matemático del proceso de optimización estructural, enfocado en los elementos de corte (columnas).
- **Actividades:**
 - Selección del Criterio de Optimización.
 - Definición de la Función Objetivo
 - Definición de los Parámetros Variables.
 - ✓ Variables de Diseño.

- ✓ Parámetros Asignados.
- ✓ Definición de las Restricciones, utilizando las restricciones de diseño y de comportamiento.
- Selección del Método Matemático de Solución.
- Solución del problema de optimización.

4.1.4. Optimización Estructural

En esta etapa del proyecto se implementará el modelo matemático de optimización estructural.

- **Objetivos:** Realizar el análisis estructural del modelo inicial de evaluación, teniendo como base los resultados del numeral 6.2 de este documento, pero utilizando las secciones transversales optimas, obtenidas al correr el modelo matemático de optimización, formulado en el numeral 6.3 de este documento.
- **Actividades:**
 - Realizar el análisis sísmico de la estructura, aplicando los movimientos sísmicos de diseño prescritos, a un modelo matemático apropiado de la estructura, según el capítulo A.3 de la NSR-10, utilizando las secciones transversales optimas de los elementos de corte, obtenidas del modelo matemático de optimización estructural. (Cálculo de los desplazamientos horizontales).
 - Evaluación de los desplazamientos horizontales, incluyendo los efectos torsionales de toda la estructura y las derivas (desplazamiento relativo entre niveles contiguos) según el capítulo A.6 de la NSR-10, utilizando los resultados del paso anterior.

4.1.5. Análisis de resultados

En esta fase del proyecto, se busca determinar los efectos que se producen en la solución óptima al realizar cambios en cualquiera de los parámetros del modelo matemático planteado inicialmente. Entre los cambios que se investigan están: los cambios en los valores de las variables en la función objetivo, tales como los desplazamientos en los pórticos de la estructura analizada, teniendo en cuenta las restricciones utilizadas.

- **Objetivo:** Identificar el intervalo permisible de variación en los cuales las variables o parámetros pueden fluctuar sin que cambie la solución óptima.
- **Actividades:**
 - Prueba de optimización: se verifica si esta solución es óptima y factible, mediante la comprobación de que se cumpla la deriva máxima de piso permisible según la NSR-10.
 - Re-optimización: si esta solución no pasa teniendo como restricción el valor de la deriva máxima de piso según la NSR-10, se procede a buscar la nueva solución óptima, revisando el modelo matemático de optimización estructural.

4.1.6. Formulación de Conclusiones

En esta fase se analizarán, los datos obtenidos en el numeral 6.5, para desarrollar las respectivas conclusiones. Simultáneamente se trabajará en la redacción del documento final, y de un artículo científico.

- **Objetivo:** Formular conclusiones y recopilar los resultados del análisis de sensibilidad para ser publicados en un artículo científico.
- **Actividades:**

- Analizar los desplazamientos finales de los pórticos, utilizando las secciones transversales optimizadas de los elementos de corte.
- Analizar las derivas de piso según los parámetros del punto anterior.
- Realizar las conclusiones.
- Redacción del documento final.
- Redacción del artículo científico.

Capítulo 5

5.1. Desarrollo del Proyecto

5.1.1. Modelo Estructural Inicial

Tal y como se explicó en el numeral 6.2 de este documento, en esta fase del proyecto, se dará inicio al análisis y diseño estructural y sísmoresistente del modelo a evaluar, partiendo de un proyecto arquitectónico ya definido inicialmente; que, para nuestro caso, será de una edificación nueva estructurada en 2 niveles con una superestructura conformada por pórticos de concreto reforzado, resistentes a momento, destinado a uso residencial; de la cual se analizara en el plano, el pórtico del eje A.

5.1.2. Definición del sistema y estructuración.

- Definición del sistema estructural y estructuración

Según la NSR-10, se reconocen cuatro (4) tipos generales de sistemas estructurales de resistencia sísmica como son:

- a) Sistema de muros de carga
- b) Sistema combinado
- c) Sistema de pórtico
- d) Sistema dual

El sistema estructural que conformara la estructura es el tipo pórtico, el cual es un sistema compuesto por un pórtico espacial resistente a momentos, esencialmente completo sin diagonales que resiste todas las cargas verticales y fuerzas horizontales.

- Evaluación de las solicitaciones definitivas, según el título B de la NSR-10.

El diseño de la estructura y sus componentes se realizó de tal forma que las resistencias de diseño igualaran o excedieran los efectos producidos por las cargas mayoradas en las siguientes combinaciones:

Tabla 5.1

Combinaciones de cargas utilizadas en el análisis de cargas

Combinación	Nomenclatura NSR-10
1.4D	B.2.4-1
1.2D+1.6L	B.2.4-2
1.2D+1Ex+1L	B.2.4-5
1.2D+1Ey+1L	B.2.4-5

- Obtención del nivel de amenaza sísmica y los valores de Aa y Av, Fa, Fv y coeficiente de importancia I, según el título A de la NSR-10.

COEFICIENTE DE ACCELERACIÓN PICO EFECTIVA:	Aa	0.35	TAB A.2.3-2/FIG. A.2.3-2
COEFICIENTE DE VELOCIDAD PICO EFECTIVA:	Av	0.25	TAB A.2.3-2/FIG. A.2.3-3
TIPO DE PERFIL DEL SUELO:		E	TABLA A.2.4-1 /A.2.4-2
COEFICIENTE DE AMPLIFICACIÓN PARA PERIODOS CORTOS:	Fa	1.05	TABLA A.2.4-3
COEFICIENTE DE AMPLIFICACIÓN PARA PERIODOS INTERMEDIOS:	Fv	3	TABLA A.2.4-4
CLASIFICACIÓN DE GRUPO DE LA ESTRUCTURA: (grupo de uso)		I	A.2.5.1
COEFICIENTE DE IMPORTANCIA: (según grupo de uso)	I	1	TABLA A.2.5-1

Figura 5.1, nivel de amenaza sísmica, elaboración propia

- Definir movimientos sísmicos de diseño, con base en el espectro elástico de diseño, y el periodo fundamental de la estructura.

SISTEMA ESTRUCTURAL:		PORTICOS RESISTENTE A MOMENTO	A.3.2.1
COEFICIENTE DE CAPACIDAD DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA BÁSICO	R_o	7	TABLA A.3-1/A.3-2/A.3-3/A.3-4
COEFICIENTE DE SOBRERESISTENCIA	Ω	3	A.3.9
CAPACIDAD DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA MÍNIMA REQUERIDA:		DES	TABLA A.3-1/A.3-2/A.3-3/A.3-4
COEFICIENTE PARA IRREGULARIDADES EN PLANTA	ϕ_p	1	TABLA A.3-6
COEFICIENTE PARA IRREGULARIDADES EN ALTURA	ϕ_a	1	TABLA A.3-7
COEFICIENTE PARA AUSENCIAS DE REDUNDANCIA	ϕ_r	1	A.3.3.8
COEFICIENTE DE CAPACIDAD DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA PARA DISEÑO	R	7	A.3.3-1

CÁLCULO DEL ESPECTRO DE ACELERACIONES S_a			
ESPECTRO DE ACELERACIONES PARA $T_a < T_c$	S_s	0.92	A.2.6-3
ESPECTRO DE DISEÑO PARA $T_c < T_a < T_L$	S_s	1.17	A.2.6-1
ESPECTRO DE ACELERACIONES PARA $T_a > T_L$	S_s	10.89	A.2.6-5
ESPECTRO DE DISEÑO PARA MODELACIÓN INICIAL	S_s	0.92	

Figura 5.2, espectro elástico de diseño S_a , elaboración propia

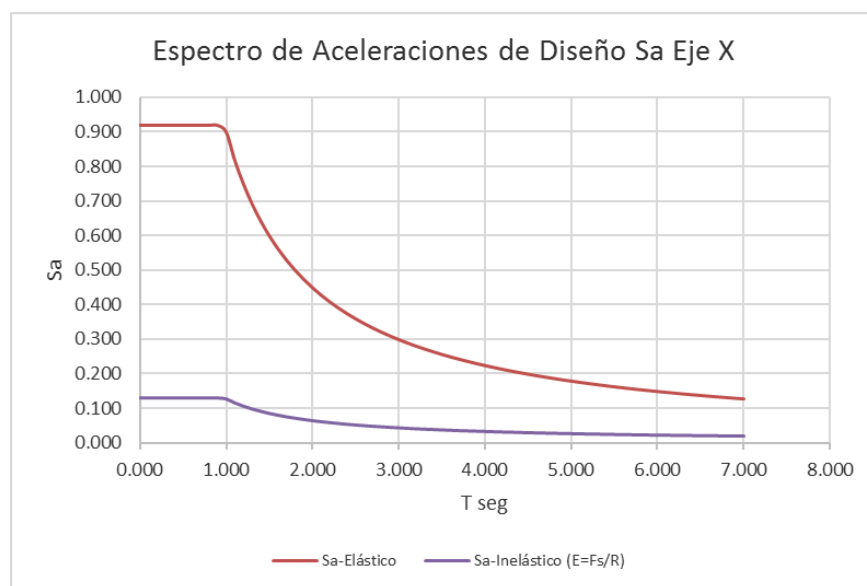


Figura 5.3, gráfica aceleración espectral “ S_a ” vs periodo “ T ”, elaboración propia

- 33Clasificación dentro de uno de los sistemas estructurales prescritos en el capítulo A.3 de la NSR.10, teniendo en cuenta las características de la estructuración y del material estructural empleado.

Como se definió anteriormente, el sistema estructural de la edificación es de pórticos resistentes a momentos, y su sistema de resistencia sísmica tanto para fuerzas horizontales como para cargas verticales, es de capacidad especial de disipación de energía (DES), por lo que el proyecto se encuentra dentro de una zona de amenaza sísmica alta, obteniendo como R_0 el valor de 7.

- Definir el procedimiento de análisis sísmico de la estructura de acuerdo con la regularidad o irregularidad de la configuración de la edificación, tanto en planta como en alzado, su grado de redundancia o de ausencia de ella en el sistema estructural de resistencia sísmica, según el capítulo A.3 de la NSR-10

El método de análisis estructural a utilizar ha sido el *método de la fuerza horizontal equivalente*, dado que es una estructura regular tanto en planta como en altura, y tiene menos de 20 niveles.

- Obtención de las fuerzas sísmicas que deben aplicarse a la estructura. (Cálculo cortante basal V_s , y distribución de las fuerzas sísmicas F_x , a cada nivel de la estructura). según los movimientos sísmicos de diseño definidos.

CALCULO DEL CORTANTE EN LA BASE V_s			
MASA TOTAL DE LA EDIFICACIÓN EN KG:	M	58354.80	ANAL. DE CARGAS
ACELERACIÓN DE LA GRAVEDAD m/s^2 :	g	9.8	
CORTANTE BASAL EN KN:	V_s	525.41	A.4.3-1

Figura 5.4, fuerzas sísmicas de diseño, elaboración propia

EXPONENTE RELACIONADO CON T PARA MODELACION INICIAL	k	1.14	A.4.3.1
---	---	------	---------

Figura 5.5, exponente k, para el cálculo del periodo inicial, elaboración propia

FUERZA SISMICA HORIZONTAL Fx						Fx
Px	nx	mx KG	hx	$(mx*hx)^k$	Cxv	Fx KN
P3	3	29177.4	6.0	223265.5	68.7%	361.08
P2	2	29177.4	3.0	101608.7	31.3%	164.33
P1	0	0.0	0.0	0.0	0.0%	0.00
	TOTAL	58354.8		324874.1	100%	525.41

Figura 5.6, fuerza horizontal equivalente por nivel, elaboración propia

- Realizar el análisis sísmico de la estructura, aplicando los movimientos sísmicos de diseño prescritos, a un modelo matemático apropiado de la estructura, según el capítulo A.3 de la NSR-10. (Cálculo de los desplazamientos horizontales).

EVALUACIÓN DEL PERIODO FUNDAMENTAL DE LA ESTRUCTURA T									
ni	mi KG	δ_x	δ_y	δ_i	Fi (N)	$m_i*(\delta_i^2)$	$f_i*(\delta_i)$	T	% Ta con T
3	29177,4	0,0854	0,0000	0,0854	361082,5	212,62	30823,59	0,522	CUMPLE
2	29177,4	0,0392	0,0000	0,0392	164329,5	44,88	6445,17		
TOTAL	58354,8				525412,0	257,50	37268,76		

COEFICIENTE PARA EL CALCULO DEL T MAX PERMISIBLE DE LA ESTRU:	C_u	0,85	A.4.2-2
EVALUACION DE C_u (C_u NO DEBE SER MENOR QUE 1,2)	$C_u > 1,2$	NO CUMPLE	A.4.2.1
PERIODO DE VIBRACIÓN FUNDAMENTAL APROXIMADO:	T_a	0,771	A.4.2-3
T MAXIMO PRODUCTO ENTRE C_u Y T_a :	$C_u * T_a$	0,9258	A.4.2.1
PERIODO FUNDAMENTAL MÁXIMO DE LA EDIFICACION EN sg:	T	0,926	A.4.2-1
EVALUACIÓN DE T (T NO PUEDE EXCEDER DE $C_u * T_a$):	$T < C_u * T_a$	CUMPLE	A.4.2.1

Figura 5.7, evaluación periodo fundamental de la estructura, elaboración propia

- Evaluación de los desplazamientos horizontales, incluyendo los efectos torsionales de toda la estructura y las derivas (desplazamiento relativo entre niveles contiguos) según el capítulo A.6 de la NSR-10.

DERIVA MAXIMA PORTICO EJE-XA								
Nivel	U1	U2	DERIVA-X				NSR-10	CUMPLE
	m	m	Δ [μ]	HPI	Δ permitida [m]	% Δ (piso)	A.6.4.1.1	
2	0.0853644	0.00000	0.046143	3	0.03	1.54%	1.54%	REVISAR
1	0.0392211	0.00000	0.039221	3	0.03	1.31%	1.31%	REVISAR
0	0.0000000	0.00000	0.000000	0	0.00	0.00%	0.00%	OK

Figura 5.8, cálculo deriva máxima, elaboración propia

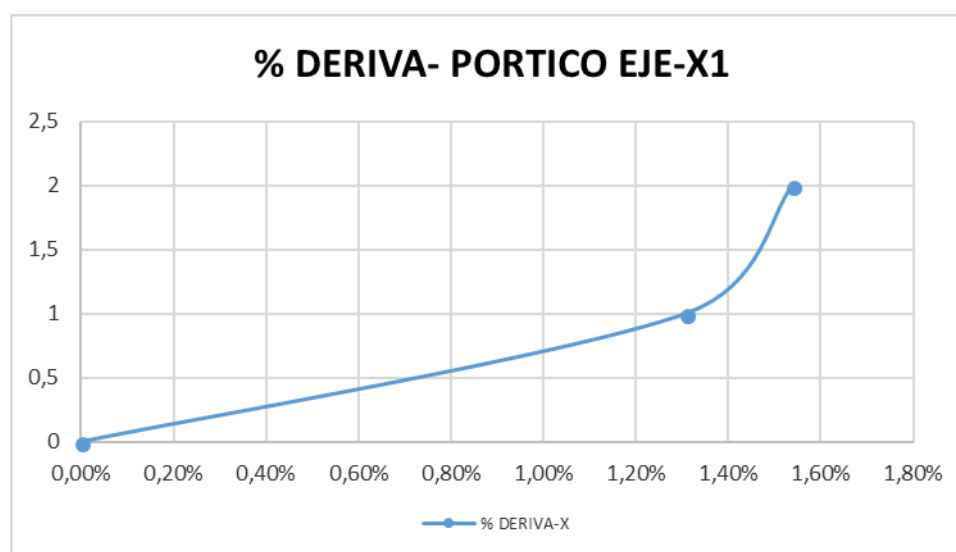


Figura 5.9, gráfica deriva máxima, elaboración propia

5.1.3. Formulación del modelo matemático

En esta etapa del proyecto se dará inicio a la estructuración del modelo matemático que se implementará en la optimización estructural.

- Selección del Criterio de Optimización.

Existen diferentes criterios de optimización dependiendo de lo que se quiera optimizar y del resultado hacia el cual va encaminado la optimización. Para este trabajo el criterio de optimización es la optimización por tamaño, el cual busca la minimización de la sección de las columnas del pórtico que se eligió de la estructura, siendo este el pórtico A.

Las dimensiones iniciales de las columnas ($\ell * \ell$) son (0.3*0.3) unidades en metros.

- Definición de la Función Objetivo

Como función objetivo, se escogió minimizar la sección de las columnas, dado que estas son cuadradas, la función objetivo se reduce a minimizar uno de los lados de estas, a la cual hemos nombrado ℓ ; para esto recurrimos a un modelo de optimización no lineal.

- Definición de los Parámetros Variables.

- ✓ Variables de Diseño.

a) Lado de la columna (ℓ)

b) Desplazamientos en los nudos, para cada grado de libertad (u_{Ni}^j)

- ✓ Parámetros Asignados. (ver figura 18 página 61)

		A	PARAMETRO					
		B	VARIABLE DE DISEÑO					
	NUDO							
ℓ	N3		N4		N5		N6	
X1	A	B	A	B	A	B	A	B
	X2	U^1_{N3}	X5	U^1_{N4}	X8	U^1_{N5}	X11	U^1_{N6}
	X3	U^2_{N3}	X6	U^2_{N4}	X9	U^2_{N5}	X12	U^2_{N6}
	X4	U^3_{N3}	X7	U^3_{N4}	X10	U^3_{N5}	X13	U^3_{N6}

Figura 5.10, parámetros asignados y variables de diseño, elaboración propia

- ✓ Definición de las Restricciones, utilizando las restricciones de diseño y de comportamiento.

a) La Deriva de piso no debe ser mayor al 1% de la altura de piso.

b) La dimensión minimizada del lado de la columna utilizada como función objetivo, no debe ser menor a 0.30 metros.

c) Los desplazamientos horizontales en los nudos deben ser positivos (en dirección del eje global).

- Selección del Método Matemático de Solución.

Teniendo en cuenta que en nuestro caso el problema de optimización se basa en encontrar el mínimo de una función no lineal de varias variables con restricciones, se ha optado por la implementación de un método matemático de programación no lineal con restricciones, sujeto a unas condiciones de igualdad y de desigualdad.

- Solución del problema de optimización.

Para lograr optimizar el diseño de los elementos de corte (columnas) teniendo en cuenta su menor dimensión, se tomarán los resultados obtenidos en el numeral 7.1.1, tales como los desplazamientos en los nudos y la dimensión de la columna con la que se corrió el modelo estructural inicial en sap2000, el cual fue sometido a solicitaciones sísmicas, (fuerzas horizontales).

El pórtico que conforma la estructura, escogido para su modelación bidimensional, ha sido el pórtico 1, el cual tiene las siguientes dimensiones iniciales:

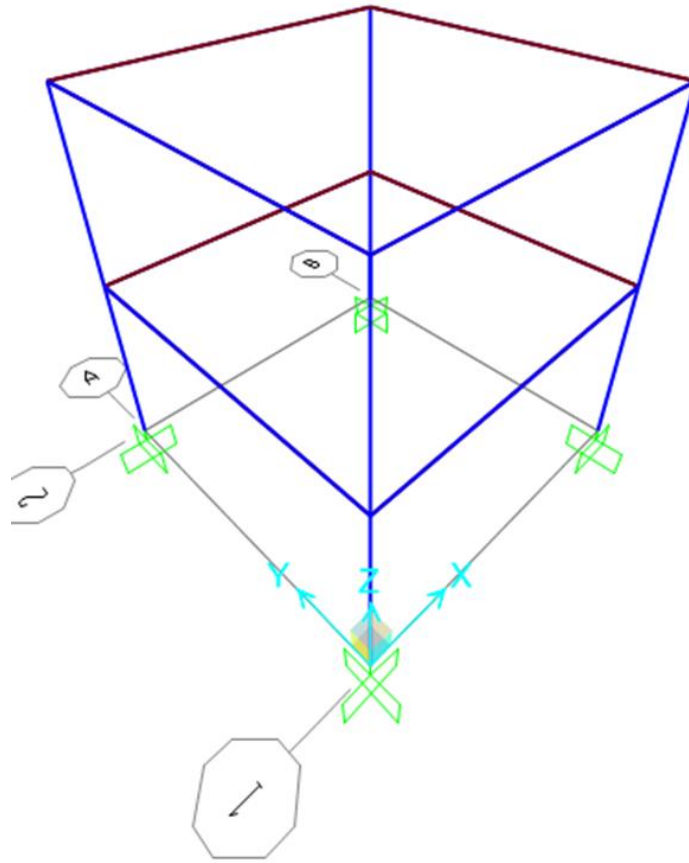


Figura 5.11, modelo 3D, pórtico que conforma la estructura, elaboración propia

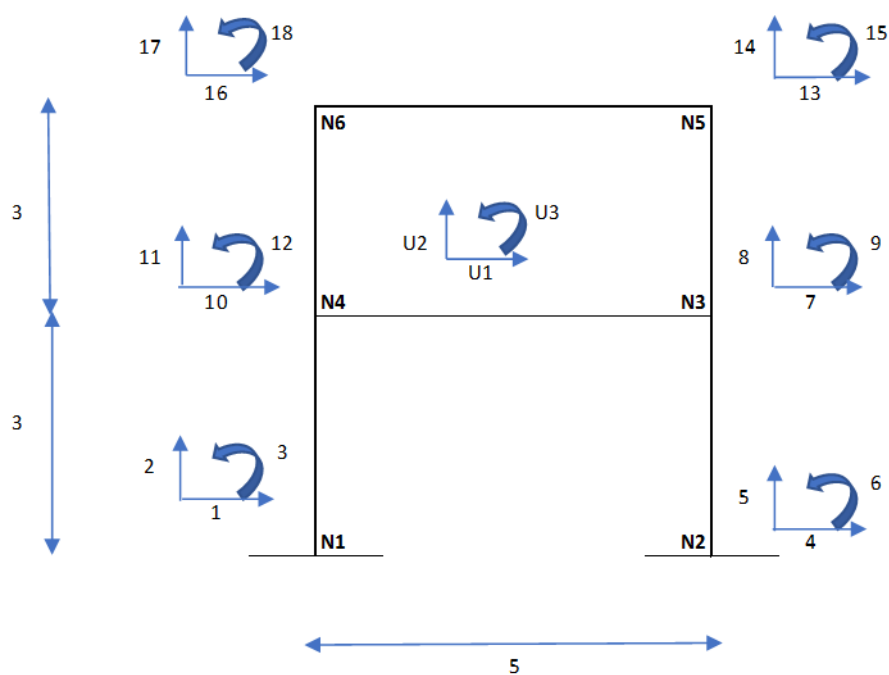


Figura 5.12, pórtico que conforma la estructura, elaboración propia

El cual cuenta con las siguientes dimensiones y propiedades de los materiales:

VIGAS			COLUMNAS		
E	20000000	KN/M ²	E	20000000	KN/M ²
L	5.5	M	L	3.0	M
B	0.3	M	B	0.3	M
H	0.3	M	H	0.3	M
A	0.09	M ²	A	0.09	M ²
I	0.000675	M ⁴	I	0.000675	M ⁴
θ°	0	DEG	θ°	90	DEG
θrad	0.00000	rad	θrad	1.57075800	rad
12EI/L ³	973.704	KN/M	12EI/L ³	6000.00	KN/M
6EI/L ²	2677.686	KN	6EI/L ²	9000.00	KN
4EI/L	9818.182	KN*M	4EI/L	18000.00	KN*M
AE/L	327272.727	KN/M	AE/L	600000.00	KN/M
2EI/L	4909.091	KN*M	2EI/L	9000.00	KN*M
Senθ	0	Adimen	Senθ	1.0	Adimen
Cosθ	1	Adimen	Cosθ	0.0	Adimen

Figura 5.13, propiedades de los materiales, elaboración propia

Donde:

VIGAS - COLUMNAS		
E	Modulo de elasticidad del concreto	KN/M ²
L	Longitud de elemento estructural	M
B	Ancho de la seccion del elelmento estructural	M
H	Altura de la seccion del elelmento estructural	M
A	Área de la sección	M ²
I	Momento de inercia de la sección	M ⁴
θ°	Orientación de los ejes locales del elemento estructural	DEG
θ_{rad}	Orientación de los ejes locales del elemento estructural	rad

Figura 5.14, nomenclatura elementos estructurales, elaboración propia

5.1.4. Metodología general para resolver el problema planteado

Ya con la estructura analizada inicialmente para las solicitaciones sísmicas según el espectro de diseño, y con los valores de desplazamientos y fuerzas sísmicas obtenidas de dicho análisis, procedemos a plantear la ecuación de desplazamiento en forma matricial según el procedimiento descrito en el numeral 5.1.2 de este documento, obteniendo la siguiente matriz de rigidez en función de la dimensión (ℓ), de la columnas, teniendo en cuenta que es la misma dimensión para todas las columnas de la estructura y para cada una de ellas ya que es de sección cuadrada.

a) Matriz de rigidez para un elemento frame en coordenadas locales

		U1	U2	U3	U4	U5	U6
	U1	AE/L	0	0	$-AE/L$	0	0
	U2	0	$12EI/L^3$	$6EI/L^2$	0	$-12EI/L^3$	$6EI/L^2$
k=	U3	0	$6EI/L^2$	$4EI/L$	0	$-6EI/L^2$	$2EI/L$
	U4	$-AE/L$	0	0	AE/L	0	0
	U5	0	$-12EI/L^3$	$-6EI/L^2$	0	$12EI/L^3$	$-6EI/L^2$
	U6	0	$6EI/L^2$	$2EI/L$	0	$-6EI/L^2$	$4EI/L$

Figura 5.15, matriz de rigidez para un elemento frame, en coordenadas locales, elaboración propia

b) Matriz de transformación de coordenadas locales a coordenadas globales por elemento frame

		1	2	3	4	5	6
	1	$\cos\theta$	$\sin\theta$	0	0	0	0
T=	2	$-\sin\theta$	$\cos\theta$	0	0	0	0
	3	0	0	1	0	0	0
	4	0	0	0	$\cos\theta$	$\sin\theta$	0
	5	0	0	0	$-\sin\theta$	$\cos\theta$	0
	6	0	0	0	0	0	1

Figura 5.16, matriz de transformación de coordenadas locales a coordenadas globales, elaboración propia

c) Matriz de rigidez para un elemento frame en coordenadas globales

		U7	U8	U9	U10	U11	U12
	U7	$(\cos\theta)(AE/L)(\cos\theta)+(-\sin\theta)(12EI/L^3)(-\sin\theta)$	$(\cos\theta)(AE/L)(\sin\theta)+(-\sin\theta)(12EI/L^3)(\cos\theta)$	$(-\sin\theta)(6EI/L^2)$	$(\cos\theta)(-AE/L)(\cos\theta)+(-\sin\theta)(-12EI/L^3)(-\sin\theta)$	$(\cos\theta)(-AE/L)(\sin\theta)+(-\sin\theta)(-12EI/L^3)(\cos\theta)$	$(-\sin\theta)(6EI/L^2)$
	U8	$(\sin\theta)(AE/L)(\sin\theta)+(\cos\theta)(12EI/L^3)(\cos\theta)$	$(-\sin\theta)(-12EI/L^3)+(\cos\theta)(\cos\theta)(12EI/L^3)$	$(\cos\theta)(6EI/L^2)$	$(\sin\theta)(-AE/L)(\cos\theta)+(\cos\theta)(-12EI/L^3)(-\sin\theta)$	$(\sin\theta)(-AE/L)(\sin\theta)+(\cos\theta)(-12EI/L^3)(\cos\theta)$	$(\cos\theta)(6EI/L^2)$
(T'*k)*T=KGc	U9	$(6EI/L^2)(-\sin\theta)$	$(\cos\theta)(6EI/L^2)$	$4EI/L$	$(-6EI/L^2)(-\sin\theta)$	$(-6EI/L^2)(\cos\theta)$	$2EI/L$
	U10	$(\cos\theta)(-AE/L)(\cos\theta)+(-\sin\theta)(-12EI/L^3)(-\sin\theta)$	$(\cos\theta)(-AE/L)(\sin\theta)+(-\sin\theta)(-12EI/L^3)(\cos\theta)$	$(-\sin\theta)(-6EI/L^2)$	$(\cos\theta)(AE/L)(\cos\theta)+(-\sin\theta)(12EI/L^3)(-\sin\theta)$	$(\cos\theta)(AE/L)(\sin\theta)+(-\sin\theta)(12EI/L^3)(\cos\theta)$	$(-\sin\theta)(-6EI/L^2)$
	U11	$(\sin\theta)(-AE/L)(\cos\theta)+(\cos\theta)(-12EI/L^3)(-\sin\theta)$	$(\sin\theta)(-AE/L)(\sin\theta)+(\cos\theta)(-12EI/L^3)(\cos\theta)$	$(\cos\theta)(-6EI/L^2)$	$(\sin\theta)(AE/L)(\cos\theta)+(\cos\theta)(12EI/L^3)(-\sin\theta)$	$(\sin\theta)(AE/L)(\sin\theta)+(\cos\theta)(12EI/L^3)(\cos\theta)$	$(\cos\theta)(-6EI/L^2)$
	U12	$(6EI/L^2)(-\sin\theta)$	$(\cos\theta)(6EI/L^2)$	$2EI/L$	$(-6EI/L^2)(-\sin\theta)$	$(-6EI/L^2)(\cos\theta)$	$4EI/L$

Figura 5.17, matriz de rigidez para un elemento frame en coordenadas globales, elaboración propia

d) Matriz global rigidez para el pórtico uno (A), el cual es el que estamos analizando bidimensionalmente (en el plano).

	U7	U8	U9	U10	U11	U12	U13	U14	U15	U16	U17	U18
KG(reducida) ₁	$2E(I^4/12)/L^3)c+(I^2/L)$ 0 0 $-I^2E/L)v$ 0 0 $-12E(I^4/12)/L^3)c$ 0 $-6E(I^4/12)/L^2)c$ 0 0 0 0 0 0	0 $3(I^4/12)/L^3)v+2(I^2/L)$ $-6E(I^4/12)/L^2)v$ 0 $-12E(I^4/12)/L^3)v$ $-6E(I^4/12)/L^2)v$ 0 $E(I^4/12)/L^3)v+(I^2/L)$ $-6E(I^4/12)/L^2)v$ 0 $-12E(I^4/12)/L^3)v$ $-6E(I^4/12)/L^2)v$ 0 0 0	0 $-6E(I^4/12)/L^2)v$ $12/L)v+(2(4E(I^4/12)/L^3)c+(I^2/L))v+(2(12E(I^4/12)/L^3)c+(I^2/L))v$ $6E(I^4/12)/L^2)v$ $2E(I^4/12)/L^2)v$ $6E(I^4/12)/L^2)c$ 0 $6E(I^4/12)/L^2)c$ 0 $2E(I^4/12)/L^2)c$ 0 $6E(I^4/12)/L^2)c$ 0 $6E(I^4/12)/L^2)c$ 0 $6E(I^4/12)/L^2)c$	$-I^2E/L)v$ 0 0 $L)v+(2(12E(I^4/12)/L^3)c+(I^2/L))v+(2(12E(I^4/12)/L^3)c+(I^2/L))v$ 0 $6E(I^4/12)/L^2)v$ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 $3(I^4/12)/L^3)v+2(I^2/L)$ $-6E(I^4/12)/L^2)v$ 0 $3(I^4/12)/L^3)v+2(I^2/L)$ $-6E(I^4/12)/L^2)v$ 0 $E(I^4/12)/L^3)c+(I^2/L)$ 0 0 0 0 0 0 0	0 $-6E(I^4/12)/L^2)v$ $2E(I^4/12)/L^2)v$ 0 $6E(I^4/12)/L^2)v$ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	$-12E(I^4/12)/L^3)c$ 0 $6E(I^4/12)/L^2)c$ 0 0 0 $E(I^4/12)/L^3)c+(I^2/L)$ 0 $6E(I^4/12)/L^2)c$ $-6E(I^4/12)/L^2)v$ 0 $6E(I^4/12)/L^2)c$ $-I^2E/L)v$ 0 0 0	0 $-I^2E/L)c$ 0 0 0 0 $E(I^4/12)/L^3)v+(I^2/L)$ $-6E(I^4/12)/L^2)v$ 0 0 0 0 0 0	$-6E(I^4/12)/L^2)c$ 0 $2E(I^4/12)/L^2)c$ 0 0 0 $6E(I^4/12)/L^2)c$ $-6E(I^4/12)/L^2)v$ 0 $6E(I^4/12)/L^2)c$ 0 0 0 0	0 0 0 $-12E(I^4/12)/L^3)c$ 0 $6E(I^4/12)/L^2)c$ $-I^2E/L)v$ 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 $-I^2E/L)c$ 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 $-6E(I^4/12)/L^2)c$ 0 $2E(I^4/12)/L^2)c$ 0 $-6E(I^4/12)/L^2)v$ $2E(I^4/12)/L^2)v$ $6E(I^4/12)/L^2)c$ $6E(I^4/12)/L^2)c$ $6E(I^4/12)/L^2)c$ $6E(I^4/12)/L^2)c$ $6E(I^4/12)/L^2)c$ $6E(I^4/12)/L^2)c$

Figura 5.18, matriz de rigidez para el pórtico A, elaboración propia

e) Seguido procedemos a armar las ecuaciones en forma general, teniendo en cuenta la ecuación de desplazamiento $F=K*U$

ECUACIONES EN FORMA GENERAL									
F7	$((1481481.48 * \ell^4) + (327272.727)) * U7$	$-327272.72 * U10$	$(-740740.74 * \ell^4) * U13$	$(-1111111.11 * \ell^4) * U15$				=	39.5
F8	$((973.70) + (13333333.3 * \ell^2)) * U8$	$-2677.68 * U9$	$-973.70 * U11$	$-2677.68 * U12$	$(-600000 * \ell^2) * U14$			=	0
F9	$-2677.68 * U8$	$((9818.18) + (4444444.44 * \ell^4 * \ell)) * U9$	$2677.68 * U11$	$4909.09 * U12$	$(1111111.11 * \ell^4) * U13$	$(1111111.11 * \ell^4) * U15$		=	0
F10	$-327272.72 * U7$	$((327272.727) + (1481481.48 * \ell^4 * \ell)) * U10$	$(-740740.74 * \ell^4) * U16$	$(-1111111.11 * \ell^4) * U18$				=	39.5
F11	$-973.70 * U8$	$2677.68 * U9$	$((973.70) + (13333333.3 * \ell^2)) * U11$	$2677.68 * U12$	$(-666666.66 * \ell^2) * U17$			=	0
F12	$-2677.68 * U8$	$4909.09 * U9$	$2677.68 * U11$	$((4444444.44 * \ell^4) + (9818.18)) * U12$	$(1111111.11 * \ell^4) * U16$	$(1111111.11 * \ell^4) * U18$		=	0
F13	$(-740740.74 * \ell^4) * U7$	$(1111111.11 * \ell^4) * U9$	$((740740.741 * \ell^4) + (327272.72)) * U13$	$1111111.11 * \ell^4 * U15$	$-327272.72 * U16$			=	73.71
F14	$(-600000 * \ell^2) * U8$	$((973.70) + (666666.67 * \ell^2)) * U14$	$-2677.68 * U15$	$-973.70 * U17$	$-2677.68 * U18$			=	0
F15	$(-1111111.11 * \ell^4) * U7$	$(1111111.11 * \ell^4) * U9$	$(1111111.11 * \ell^4) * U13$	$-2677.68 * U14$	$((2222222.22 * \ell^4) + (9818.18)) * U15$	$2677.68 * U17$	$4909.09 * U18$	=	0
F16	$(-740740.74 * \ell^4) * U10$	$(1111111.11 * \ell^4) * U12$	$-327272.72 * U13$	$((740740.74 * \ell^4) + (327272.73)) * U16$	$(1111111.11 * \ell^4) * U18$			=	73.71
F17	$(-666666.66 * \ell^2) * U11$	$-973.70 * U14$	$2677.68 * U15$	$((973.7) + (666666.67 * \ell^2)) * U17$	$2677.68 * U18$			=	0
F18	$(-1111111.11 * \ell^4) * U10$	$1111111.11 * \ell^4 * U12$	$-2677.68 * U14$	$4909.09 * U15$	$(1111111.11 * \ell^4) * U16$	$2677.68 * U17$	$((9818.18) + (2222222.22 * \ell^4)) * U18$	=	0

Figura 5.19, ecuaciones en forma general para el pórtico A, elaboración propia

Teniendo en cuenta las restricciones de igualdad, (las cuales deben quedar en función de (ℓ)) según el numeral 7.2 literales a, b, c, que son:

- a) La Deriva de piso no debe ser mayor al 1% de la altura de piso.
- b) La dimensión minimizada del lado de la columna utilizada como función objetivo, no debe ser menor a 0.30 metros.
- c) Los desplazamientos horizontales en los nudos deben ser positivos (en dirección del eje global).

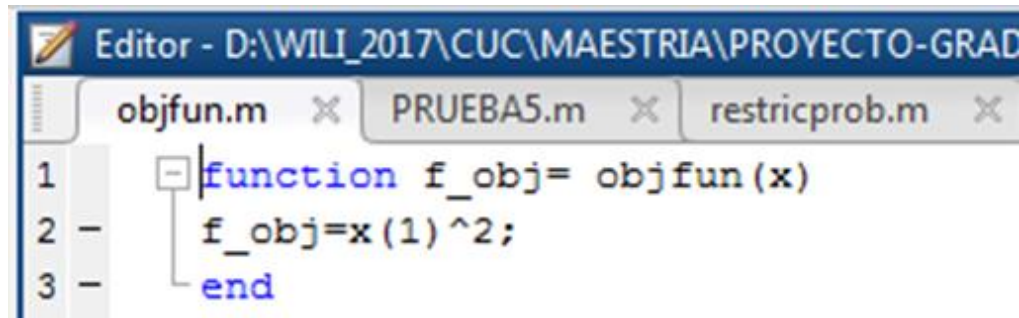
Que para nuestro caso de estudio quedan así:

- a) $\Delta = \sqrt{(\delta_i^j)^2 - (\delta_{i-1}^j)^2}$ siendo
 - Δ = la deriva de piso máxima
 - δ_i^j = desplazamiento en el piso i del nivel j
- b) $(\ell) \geq 0.30 \text{ M}$
- c) $\delta_i^j \geq 0$

y con las ecuaciones en forma general según la figura 25, (las cuales contienen la desigualdad), se plantea el modelo matemático para resolver el problema de optimización no lineal, el cual se presenta a continuación, basado en el comando **fmincon**, contenido en el software MARLAB, y que tiene que ver con la solución de problemas de optimización no lineal, tales que la minimización de la función objetivo está sujeta a un conjunto de restricciones.

El modelo matemático se planteó en MATLAB de la siguiente manera:

a) Función Objetivo

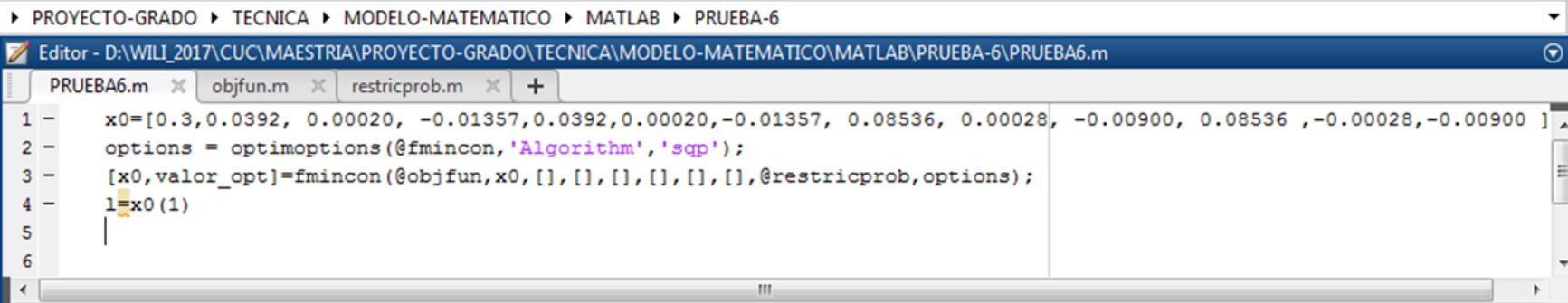


The screenshot shows the MATLAB Editor window with the title bar 'Editor - D:\WILI_2017\CUC\MAESTRIA\PROYECTO-GRAD'. The active file is 'objfun.m'. The code in the editor is as follows:

```
1 function f_obj= objfun(x)
2     f_obj=x(1)^2;
3 end
```

Figura 5.20, función objetivo para el modelo matemático en MATLAB, elaboración propia

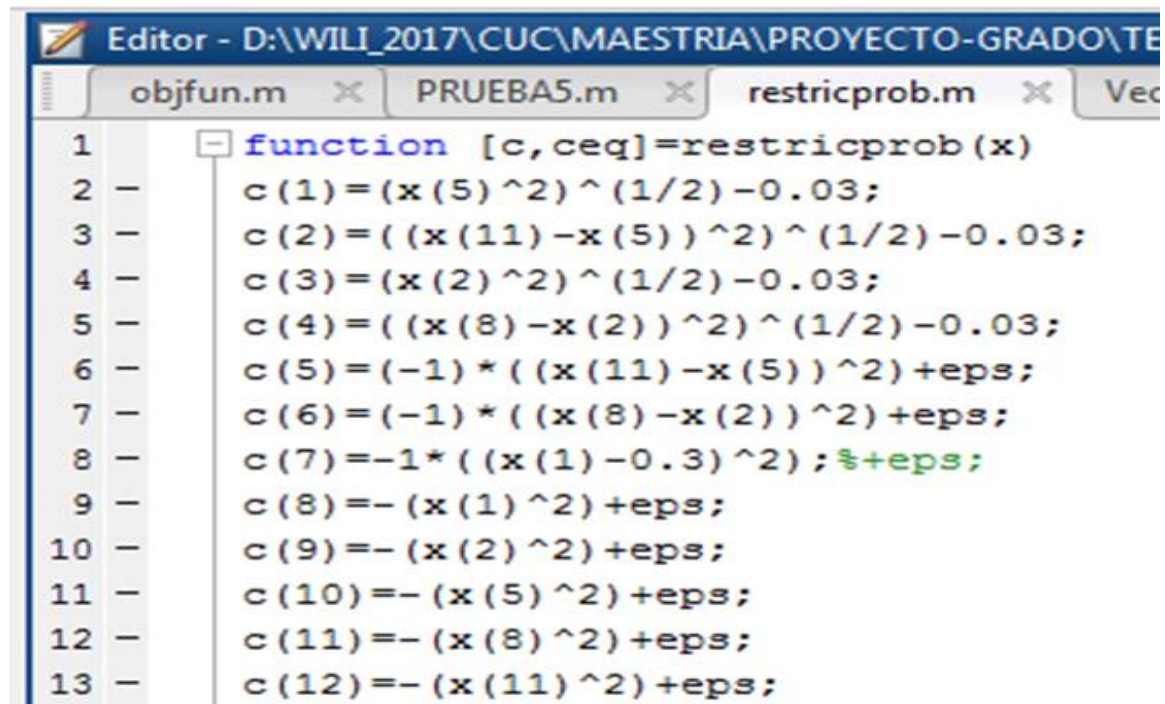
b) Comando **fmincon**



```
PROYECTO-GRADO > TECNICA > MODELO-MATEMATICO > MATLAB > PRUEBA-6
Editor - D:\WILI_2017\CUC\MAESTRIA\PROYECTO-GRADO\TECNICA\MODELO-MATEMATICO\MATLAB\PRUEBA-6\PRUEBA6.m
PRUEBA6.m  objfun.m  restricprob.m  +
1 - x0=[0.3,0.0392, 0.00020, -0.01357,0.0392,0.00020,-0.01357, 0.08536, 0.00028, -0.00900, 0.08536 ,-0.00028,-0.00900 ]
2 - options = optimoptions(@fmincon,'Algorithm','sqp');
3 - [x0,valor_opt]=fmincon(@objfun,x0,[],[],[],[],[],[],@restricprob,options);
4 - l=x0(1)
5 -
6 -
```

Figura 5.21, función **fmincon** en MATLAB, para los parámetros asignados, elaboración propia

c) Restricciones de desigualdad del problema



```
Editor - D:\WILI_2017\CUC\MAESTRIA\PROYECTO-GRADO\TE
objfun.m  PRUEBA5.m  restricprob.m  Vec
1  function [c,ceq]=restricprob(x)
2  -    c(1)=(x(5)^2)^(1/2)-0.03;
3  -    c(2)=((x(11)-x(5))^2)^(1/2)-0.03;
4  -    c(3)=(x(2)^2)^(1/2)-0.03;
5  -    c(4)=((x(8)-x(2))^2)^(1/2)-0.03;
6  -    c(5)=(-1)*((x(11)-x(5))^2)+eps;
7  -    c(6)=(-1)*((x(8)-x(2))^2)+eps;
8  -    c(7)=-1*((x(1)-0.3)^2);%+eps;
9  -    c(8)=- (x(1)^2)+eps;
10 -    c(9)=- (x(2)^2)+eps;
11 -    c(10)=- (x(5)^2)+eps;
12 -    c(11)=- (x(8)^2)+eps;
13 -    c(12)=- (x(11)^2)+eps;
```

Figura 5.22, restricciones de igualdad en MATLAB, para los parámetros asignados, elaboración propia

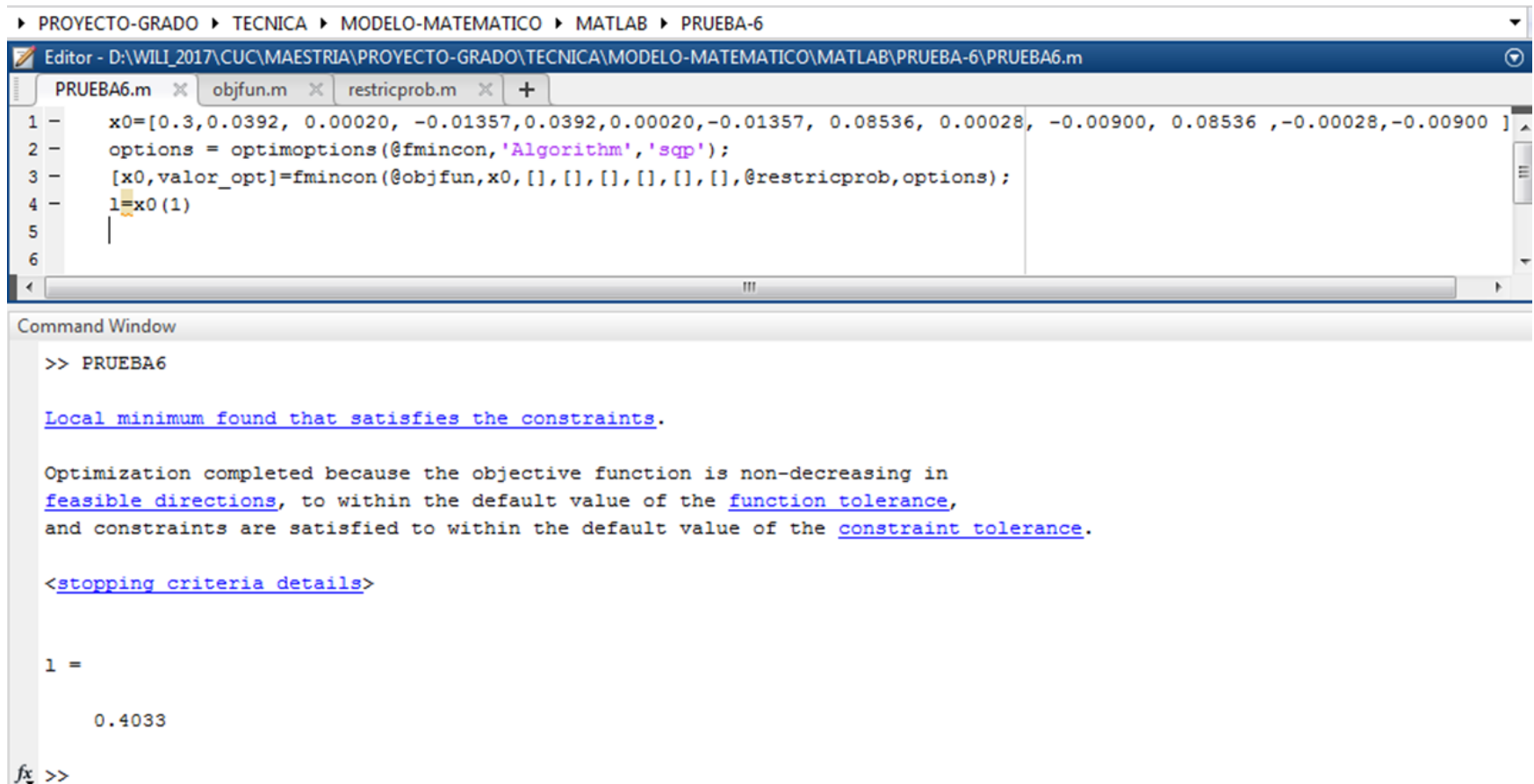
d) Restricciones de igualdad del problema

```

14 - ceq(1)=(1481481.48*x(1)^4+327272.727)*x(5)-(327272.72*x(2))-(740740.74*x(1)^4*x(11))-(1111111.11*x(1)^4*x(13))-39.5;
15 - ceq(2)=(973.70+13333333.3*x(1)^2)*x(6)-(2677.68*x(7))-(973.3*x(3))-(2677.68*x(4))-(6666666.66*x(1)^2*x(12));
16 - ceq(3)=(-2677.68*x(6))+(4444444.44*x(1)^4+9818.18)*x(7)+(2677.68*x(3))+(4909.09*x(4))+(1111111.11*x(1)^4*x(11))+(1111111.11*x(1)^4*x(13));
17 - ceq(4)=(-327272.72*x(5))+(327272.727+1481481.48*x(1)^4)*x(2)-(740740.74*x(1)^4*x(8))-(1111111.11*x(1)^4*x(10))-39.5;
18 - ceq(5)=(-973.70*x(6))+(2677.68*x(7))+(973.70+13333333.3*x(1)^2)*x(3)+(2677.68*x(4))-(6666666.66*x(1)^2*x(9));
19 - ceq(6)=(-2677.68*x(6))+(4909.09*x(7))+(2677.68*x(3))+(4444444.44*x(1)^4+9818.18)*x(4)+(1111111.11*x(1)^4*x(8))+(1111111.11*x(1)^4*x(10));
20 - ceq(7)=(-740740.74*x(1)^4*x(5))+(1111111.11*x(1)^4*x(7))+(740740.741*x(1)^4+327272.72)*x(11)+(1111111.11*x(1)^4*x(13))-(327272.72*x(8))-73.706;
21 - ceq(8)=(-6666666.66*x(1)^2*x(6))+(973.70+6666666.67*x(1)^2)*x(12)-(2677.68*x(13))-(973.70*x(9))-(2677.68*x(10));
22 - ceq(9)=(-1111111.11*x(1)^4*x(5))+(1111111.11*x(1)^4*x(7))+(1111111.11*x(1)^4*x(11))-(2677.68*x(12))+(2222222.22*x(1)^4+9818.18)*x(13);
23 - + (2677.68*x(9))+(4909.09*x(10));
24 - ceq(10)=(-740740.74*x(1)^4*x(2))+(1111111.11*(x(1)^4)*x(4))-(327272.72*x(11))+(740740.74*x(1)^4+327272.73)*x(8);
25 - + (1111111.11*x(1)^4*x(10))-73.706;
26 - ceq(11)=(-6666666.66*x(1)^2*x(3))-(973.70*x(12))+(2677.68*x(13))+(973.7+6666666.67*x(1)^2)*x(9)+(2677.68*x(10));
27 - ceq(12)=(-1111111.11*x(1)^4*x(2))+(1111111.11*x(1)^4*x(4))-(2677.68*x(12))+(4909.09*x(13))+(1111111.11*x(1)^4*x(8));
28 - + (2677.68*x(9))+(2222222.22*x(1)^4+9818.18)*x(10);
29 - end

```

Figura 5.23, restricciones de desigualdad en MATLAB, elaboración propia



The image shows a MATLAB environment with the Editor window displaying the script `PRUEBA6.m`. The script defines an initial guess `x0` and uses `fmincon` with the 'sqp' algorithm to find a local minimum. The Command Window shows the execution of `PRUEBA6`, indicating that the optimization was successful and the local minimum was found.

```
PRUEBA6.m  x  objfun.m  x  restricprob.m  x  +
1 - x0=[0.3,0.0392, 0.00020, -0.01357,0.0392,0.00020,-0.01357, 0.08536, 0.00028, -0.00900, 0.08536 ,-0.00028,-0.00900 ]
2 - options = optimoptions(@fmincon,'Algorithm','sqp');
3 - [x0,valor_opt]=fmincon(@objfun,x0,[],[],[],[],[],[],@restricprob,options);
4 - l=x0(1)
5 -
6 -
```

Command Window

```
>> PRUEBA6

Local minimum found that satisfies the constraints.

Optimization completed because the objective function is non-decreasing in
feasible directions, to within the default value of the function tolerance,
and constraints are satisfied to within the default value of the constraint tolerance.

<stopping criteria details>

l =

    0.4033

fx >>
```

Figura 5.24, resultado dimensión óptima para los parámetros solicitados, elaboración propia

VERIFICACIÓN DERIVA MAXIMA PORTICO EJE-XA								
Nivel	U1	U2	DERIVA-X				NSR-10	CUMPLE
	m	m	Δ [m]	HPI	Δ permitida [m]	% Δ (piso)	A.6.4.1.1	
3	0,0479767	0,00000	0,029228	3	0,03	0,97%	0,97%	OK
2	0,0187490	0,00000	0,018749	3	0,03	0,62%	0,62%	OK
1	0,0000000	0,00000	0,000000	0	0,00	0,00%	0,00%	OK

Figura 5.25, verificación deriva máxima con ℓ (optimizado) de 0.40M, elaboración propia

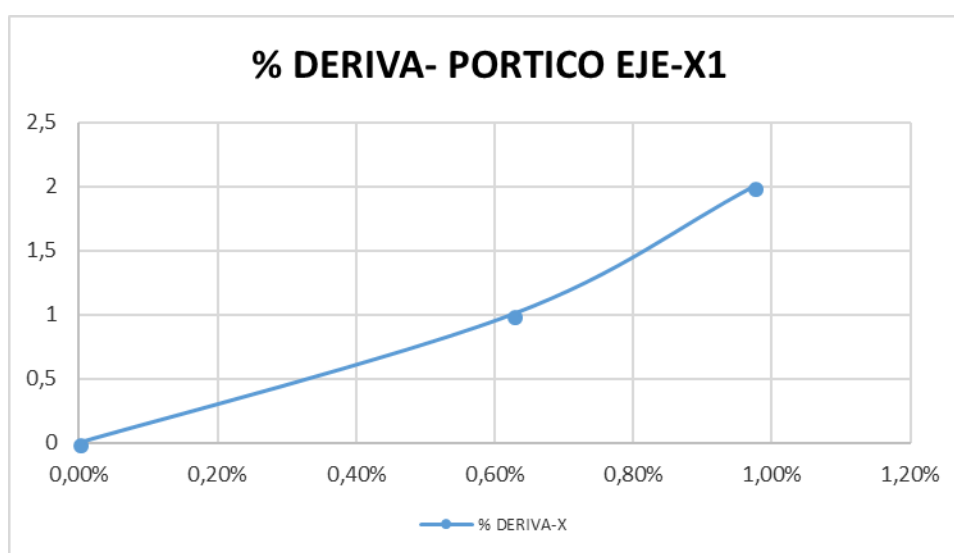


Figura 5.26, gráfica verificación deriva máxima con ℓ (optimizado) de 0.40M , elaboración propia

5.1.5. Análisis de resultados

Se evidencia que la dimensión óptima l , cumple con las restricciones impuestas en el modelo matemático, tales como dimensión mínima, deriva máxima y positivos.

Como punto de comparación para evaluar la efectividad en la optimización de la dimensión de la columna a solicitaciones de cargas laterales, se realizaron cuatro interacciones

(incluida la de la evaluación inicial), donde se evaluó la tendencia que toma la función objetivo (dimensión óptima), obteniéndose los siguientes resultados:

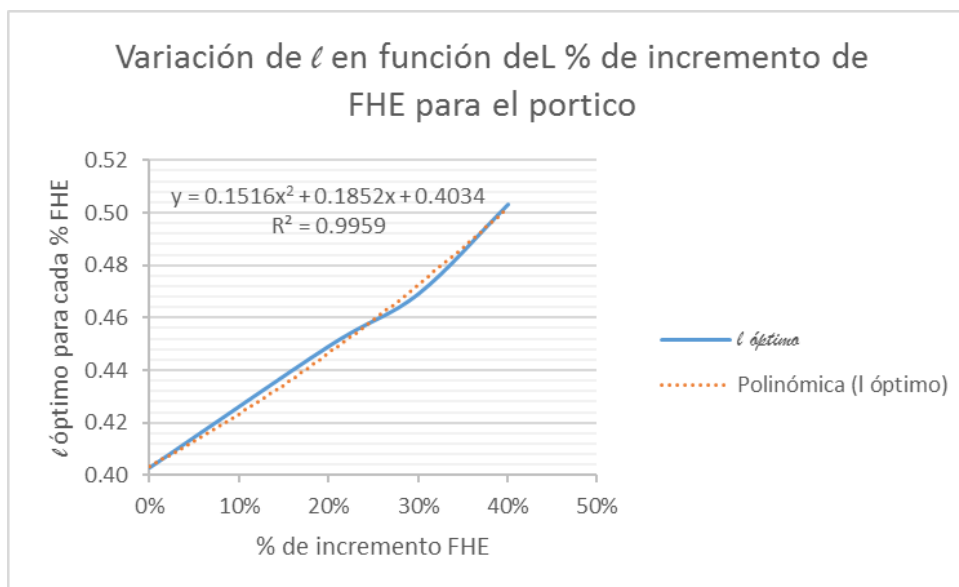


Figura 5.27, gráfica interacción de l (optimizado) para diferentes % de incremento en la FHE del pórtico, elaboración propia

Los valores de la fuerza horizontal y sus porcentajes en función del porcentaje de la evaluación inicial son:

			l Inicial	0.3
Interacc	FHE		% increm. FHE	l Óptim
	NIVEL 1	NIVEL 2		
1	39.5	76.71	0%	0.40
2	47.4	88.4	20%	0.45
3	51.35	95.8	30%	0.47
4	59.25	110.6	40%	0.50

Figura 5.28, valores que toma l (optimizado) para diferentes % de incremento en la FHE, elaboración propia

Seguido se verifico el valor óptimo obtenido en la primera interacción, con los resultados de desplazamientos y deriva obtenidos implementado el software SAP-2000, obteniendo los siguientes resultados:

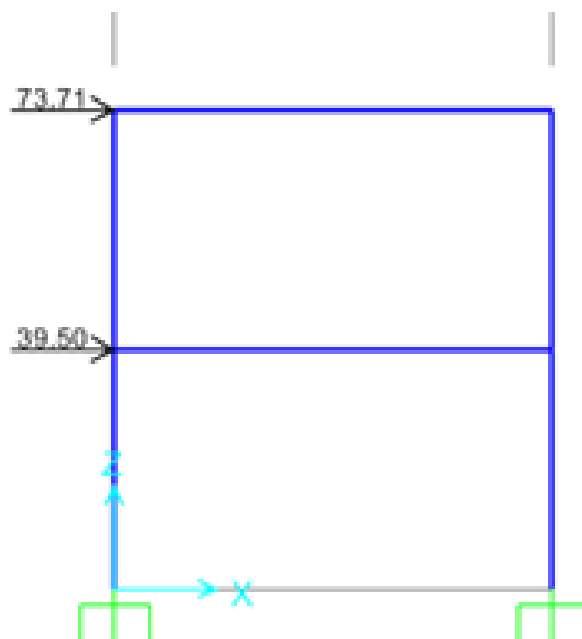


Figura 5.29, Fuerzas horizontales para cada nivel del pórtico A, en la primera interacción,
elaboración propia

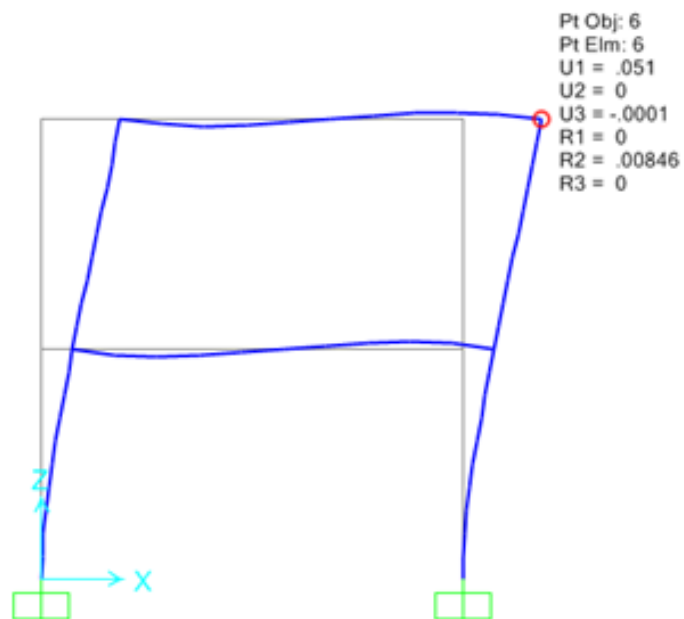


Figura 5.30, desplazamientos nivel 2 del pórtico A, en la primera interacción, elaboración propia

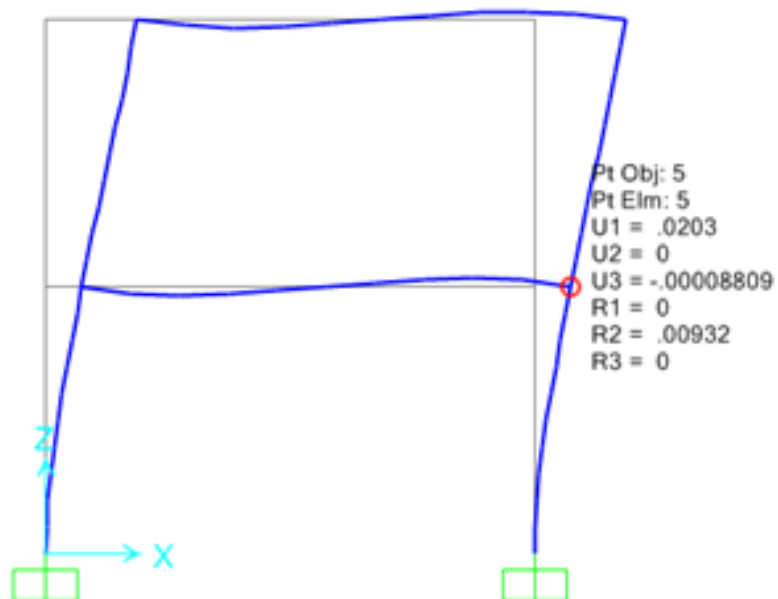


Figura 5.31, desplazamientos nivel 1 del pórtico A, en la primera interacción, elaboración propia

Del análisis realizado por el software SAP-2000, se obtienen los siguientes resultados de deriva:

VERIFICACIÓN DERIVA MAXIMA PORTICO EJE-XA								
Nivel	U1	U2	DERIVA-X				NSR-10	
	m	m	Δ [m]	HPI	Δ permitida [m]	% Δ (piso)	A.6.4.1.1	CUMPLE
3	0.0510000	0.00000	0.029228	3	0.03	1.00%	1.00%	OK
2	0.0203000	0.00000	0.018749	3	0.03	0.62%	0.62%	OK
1	0.0000000	0.00000	0.000000	0	0.00	0.00%	0.00%	OK

Figura 5.32, deriva máxima del pórtico A, calculada con los desplazamientos obtenidos

implementando el software sap-2000, elaboración propia

Conclusiones

Por último, se observa que el método más requerido por los profesionales de las áreas que intervienen en este tipo de investigación, para la realización del modelo matemático correspondiente, es el método de ELEMENTOS FINITOS, seguido de los métodos de OPTIMIZACIÓN TOPOLOGICA y PROGRAMACIÓN LINEAL, sin desmeritar el interés por utilizar los métodos METAHEURISTICOS, en especial el de ALGORITMOS GENETICOS.

Con el modelo matemático desarrollado en el lenguaje de Matlab, el cual es un modelo no lineal, se logró optimizar la sección rectangular de las columnas como elementos que aportan a la rigidez lateral para solicitaciones de cargas laterales, como por ejemplo las cargas de sísmicas, logrando obtener una dimensión mínima de 0.40. Más aun, se hicieron pruebas en las que iniciamos la variable de decisión con algunas componentes infactibles (por ejemplo, cuando iniciamos la sección de la columna en 0.30 conllevando a desplazamientos infactibles, ver figura 14), y el modelo matemático implementado nos llevó a soluciones factibles satisfaciendo el criterio de minimización de la sección de la columna, siendo igual a 0.40 (ver figuras 30 y 31).

Al comparar los resultados obtenidos evaluando la sección óptima ℓ con respecto al incremento de la fuerza lateral en cada nivel, se observó que la variación de la dimensión objetivo, es creciente en un porcentaje del 3% por cada 10% que se incrementa la fuerza sísmica o lateral en el pórtico.

Con la optimización de los elementos de corte, también se está aportando no solo a la optimización desde el punto de vista estructural, sino también en el ámbito económico, teniendo en cuenta que al reducir la sección de las columnas se optimiza el consumo del concreto a utilizar en estos elementos, lo cual nos ayudaría a optimizar el área de acero mínima en las columnas o elementos de corte.

Referencias

- Acosta G, R., de la Cruz, M., Nina S, R., & Fernández, T. A. (n.d.). Diseño Sísmico (página 2). Retrieved May 25, 2017, from <http://www.monografias.com/trabajos81/disenosismico/disenosismico2.shtml#ixzz4fUbG4hL5>
- An, H., Chen, S., & Huang, H. (2016). Structural optimization for multiple structure cases and multiple payload cases with a two-level multipoint approximation method. *Chinese Journal of Aeronautics*, 29(5), 1273–1284. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2016.08.012>
- Balogh, B., & Lógó, J. (2017). The application of drilling degree of freedom to checkerboards in structural topology optimization. *Advances in Engineering Software*, 107, 7–12. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2017.02.005>
- Bezerra, L. M., de Freitas, C. S., Matias, W. T., & Carmona, J. E. (2014). Evaluación numérica del efecto del espesor de la placa de contacto en la acción de palanca en conexión de acero tipo «T». *Revista Internacional de Métodos Numéricos Para Cálculo Y Diseño En Ingeniería*, 30(1), 11–19. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.005>
- Brea, E. (2013). Una extensión del método de Neider Mead a problemas de optimización no lineales enteros mixtos. *Revista Internacional de Metodos Numericos Para Calculo Y Diseno En Ingenieria*, 29(3), 163–174. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2013.06.005>
- Brown, N. C., & Mueller, C. T. (2016). Design for structural and energy performance of long span buildings using geometric multi-objective optimization. *Energy and Buildings*, 127, 748–761. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.05.090>
- Caballero, S. S. (2012). *Optimizacion Estructural Y Topológica De Estructuras*

Morfológicamente No Definidas Mediante Algoritmos Genéticos.

Castellanos, J. (2000). Diseño óptimo de estructuras de hormigón armado a flexo- compresión.

Cerrolaza y Annicchiarico. (1996). *Optimization of finite element bidimensional models: an approach based on genetic algorithms.*

Couceiro, I., París, J., Martínez, S., Colominas, I., Navarrina, F., & Casteleiro, M. (2016).

Structural optimization of lattice steel transmission towers. *Engineering Structures*, 117, 274–286. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.03.005>

F.J. Martinez, F. González-Vidosa, A. Hospitaler, V. Y. (2007). DISEÑO AUTOMATIZADO Y OPTIMIZACION DE ESTRUCTURAS DE HORMIGON ARMADO.

Fernandes, W. S., Greco, M., & Almeida, V. S. (2017). Application of the smooth evolutionary structural optimization method combined with a multi-criteria decision procedure.

Engineering Structures, 143, 40–51. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.04.001>

Friedlander, A. (1994). *Elementos de programação não-linear*. Retrieved from

<http://www.dm.uba.ar/materias/optimizacion/2006/1/livro.pdf>

Geem, Z. W. (2009). *Harmony Search Algorithms for Structural Design Optimization*. (Z. W.

Geem, Ed.) (Vol. 239). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

<https://doi.org/10.1007/978-3-642-03450-3>

Gentils, T., Wang, L., & Kolios, A. (2017). Integrated structural optimisation of offshore wind turbine support structures based on finite element analysis and genetic algorithm. *Applied*

Energy, 199, 187–204. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.009>

Gutiérrez-Astudillo N.C., Peniche-Vera R.R., Herrera-Ruiz G., Alvarado-Cárdenas R., &

Carrión-Viramontes F.J. (2012). Una solución no simétrica aplicando un algoritmo genético con cruzamiento natural para la optimización estructural de armaduras A Non-Symmetrical

Solution Applying a Genetic Algorithm with Natural Crossover for the Structural Optimization of Truss Structu, *XIII*(número 3), 325–338.

Hernández, S. (1991). METODOS DE DISEÑO ÓPTIMOS DE ESTRUCTURAS.

Hernández, S., & Brebbia, C. A. (2001). *Computer Aided Optimum Design of Structures VII*. Southampton, UK: WIT Press. Retrieved from <https://www.witpress.com/books/978-1-85312-868-4>

Hernández, S., Díaz, J., Baldomir, A., & Pereira, F. (2014). Un planteamiento probabilista de los criterios optimizantes mediante el principio de la máxima entropía. *Revista Internacional de Métodos Numéricos Para Cálculo Y Diseño En Ingeniería*, 30(3), 166–172. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2013.04.008>

Hernández, S., & Fontan, A. N. (2002). *Practical Applications of Design Optimization*. Southampton, UK: WIT Press. Retrieved from <https://www.witpress.com/books/978-1-85312-886-8>

Hernández Ibáñez, S. (1990). *Métodos de diseño óptimo de estructuras*. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Retrieved from <https://books.google.com.co/books?id=aODCAAAACAAJ>

Ivan Antonio Negrin Diaz. (2016). *Optimización de conjuntos estructurales considerando los factores usualmente ignorados en la modelación usando la OAPI SAP2000-MatLab*.

Jahangiry, H. A., & Tavakkoli, S. M. (2017). An isogeometrical approach to structural level set topology optimization. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 319, 240–257. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2017.02.005>

Jiang, L., & Chen, S. (2017). Parametric structural shape & topology optimization with a variational distance-regularized level set method. *Computer Methods in Applied Mechanics*

and Engineering, 321, 316–336. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2017.03.044>

- Jiménez de Cisneros, J. J., Carazo-Álvarez, D., & Carazo-Álvarez, J. D. (2014). Discusión sobre el artículo «Evaluación numérica del efecto del espesor de la placa de contacto en la acción de palanca en conexión de acero tipo T» de L.M. Bezerra, C.S. de Freitas, W.T. Matias y J.E. Carmona. *Revista Internacional de Métodos Numéricos Para Cálculo Y Diseño En Ingeniería*, 30(2), 106–107. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2013.02.001>
- Lapadula Sequera, V. A. (2014). *Estudio comparativo sobre la aplicación de los algoritmos PSO y SQP en la optimización de pórticos planos de concreto armado*. PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA.
- Li, L., & Khandelwal, K. (2015). An adaptive quadratic approximation for structural and topology optimization. *Computers & Structures*, 151, 130–147. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2015.01.013>
- Luchi, F., & Krohling, R. A. (2015). Differential Evolution and Nelder-mead for Constrained Non-linear Integer Optimization Problems. *Procedia Computer Science*, 55(Itqm), 668–677. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.07.071>
- Luemberger, D. G. (1989). *No Title Programación lineal y no- lineal*.
- Madsen, S., Lange, N. P., Giuliani, L., Jomaas, G., Lazarov, B. S., & Sigmund, O. (2016). Topology optimization for simplified structural fire safety. *Engineering Structures*, 124, 333–343. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.06.018>
- Martínez-Frutos, J., & Martí, P. (2014). Diseñó optimo robusto utilizando modelos Kriging: Aplicación al diseño optimo robusto de estructuras articuladas. *Revista Internacional de Metodos Numericos Para Calculo Y Diseno En Ingenieria*, 30(2), 97–105. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2013.01.003>

Martínez Varela, S. (2012). *OPTIMIZACIÓN MIXTA DE ESTRUCTURAS DE APOYO DE LÍNEAS DE TRANSPORTE DE ENERGÍA*. UNIVERSIDADE DA CORUÑA.

MATLAB - El lenguaje del cálculo técnico. (2018). Retrieved March 31, 2018, from <https://la.mathworks.com/products/matlab.html>

MENESES. (1997). REQUERIMIENTOS DE MODELOS MATEMATICOS EN OPTIMIZACION.

Meza, C. A., Tamayo, F., & Franco, E. E. (2015). Optimización topológica aplicada al diseño de componentes estructurales mecánicos de peso reducido. *El Hombre Y La Máquina*, 46, 72–79.

Millán Páramo, C., & Begambre Carrillo, O. (2016). Solución de problemas de optimización topológica empleando el Algoritmo Simulated Annealing Modificado. *Revista Internacional de Métodos Numéricos Para Cálculo Y Diseño En Ingeniería*, 32(2), 65–69. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2014.11.005>

Millán Páramo, C., Begambre Carrillo, O., & Millán Romero, E. (2014). Propuesta y validación de un algoritmo Simulated annealing modificado para la solución de problemas de optimización. *Revista Internacional de Métodos Numéricos Para Cálculo Y Diseño En Ingeniería*, 30(4), 264–270. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2013.10.003>

Nadal, E., Ródenas, J. J., Sánchez-Orgaz, E. M., López-Real, S., & Martí-Pellicer, J. (2014). Sobre la utilización de códigos de elementos finitos basados en mallados cartesianos en optimización estructural. *Revista Internacional de Métodos Numéricos Para Cálculo Y Diseño En Ingeniería*, 30(3), 155–165. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2013.04.009>

Negrín Montecelo, A. (1988a). Diseño óptimo de estructuras de hormigón armado a flexo-compresión.

Negrín Montecelo, A. (1988b). METODOLOGIA DE OPTIMIZACION.

Negrín Montecelo, A. (2005). UN ENFOQUE GENERAL SOBRE EL DISEÑO OPTIMO DE ESTRUCTURAS.

Negrín Montecelo, A. (2009). Diseño óptimo de estructuras de Hormigón Armado.

Negrín Montecelo, A. (2010). *Optimización de conjuntos estructurales de edificios aporticados de hormigón armado*. UNIVERSIDAD CENTRAL “MARTA ABREU” DE LAS VILLAS.

Novely Cabrales, B. D. (2015). *Análisis matricial de estructuras por el método de la rigidez*.
Apuntes.

Pallares M. y Rodríguez B. (2014). optimización del diseño de armaduras. *Revista de Ingeniería Y Región*.

París, J., Martínez, S., Nogueira, X., Colominas, I., Navarrina, F., & Casteleiro, M. (2012). Una formulación de mínimo peso con restricciones en tensión en optimización topológica de estructuras. *Revista Internacional de Metodos Numericos Para Calculo Y Diseno En Ingenieria*, 28(1), 33–48. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2011.11.002>

Romani Loayza, S. J. (2002). *OPTIMIZACION DE ESTRUCTURAS APORTICADAS DE CONCRETO ARMADO*. UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA LIMA-PERU.

Sabău, M., Cantillo Mier, Y., & Oneț, T. (2016). A review of the durability aspects for self-compacting concrete. In *REHABEND 2016 CONSTRUCTION PATHOLOGY, REHABILITATION TECHNOLOGY AND HERITAGE MANAGEMENT* (pp. 1528–1534). Burgos, Spain. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.3482924>

Sabău, M., Pop, I., & Oneț, T. (2016). Experimental study on local bond stress-slip relationship in self-compacting concrete. *Materials and Structures*, 49(9), 3693–3711.
<https://doi.org/10.1617/s11527-015-0749-5>

- Sabău, M., & Vargas, J. R. (2018). Use of e-plastic waste in concrete as a partial replacement of coarse mineral aggregate. *Computers and Concrete*, 21(4), 377–384.
<https://doi.org/10.12989/cac.2018.21.4.377>
- Sanchez-Caballero, S., Sellés Cantó, M. Á., Pla-Ferrando, R., & Peydró Rasero, M. Á. (2012). NUEVAS TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN DE ESTRUCTURAS. *3C Tecnología*, 3, 1–19.
- Sánchez, Nelson, P. (2012). *Diseño óptimo de cimientos rectangulares aislados*.
- Sánchez Caballero, S. (2012). *Optimización estructural y topológica de estructuras morfológicamente no definidas mediante algoritmos genéticos*. UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA.
- Savsani, V. J., Tejani, G. G., Patel, V. K., & Savsani, P. (2017). Modified meta-heuristics using random mutation for truss topology optimization with static and dynamic constraints. *Journal of Computational Design and Engineering*, 4, 106–130.
<https://doi.org/10.1016/j.jcde.2016.10.002>
- Sebastián Ramírez Echeverri. (2014). Metodología basada en Algoritmos Genéticos y Programación en Paralelo para el Diseño Óptimo de Armaduras de Acero.
- Señís López, R. (2014). *Optimización de mallas estructurales de acero envolventes de edificios en altura*. UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA.
- Simonetti, H. L., Almeida, V. S., & de Oliveira Neto, L. (2014). A smooth evolutionary structural optimization procedure applied to plane stress problem. *Engineering Structures*, 75, 248–258. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.05.041>
- Sozen, G. y. (1974). PROCEDIMIENTO DE DISEÑO SISMICO DE COLUMNAS.
- Tsavdaridis, K. D., Kingman, J. J., & Toropov, V. V. (2015). Application of structural topology

optimisation to perforated steel beams. *Computers & Structures*, 158, 108–123.

<https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2015.05.004>

Uarac P, P., Cendoya H, P., & Sanhueza O, J. P. (2015). Optimización topológica bidireccional con esquema de penalización de material y restricciones de desplazamiento / Bidirectional topological optimization with material penalization scheme and displacement constraints. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 23(1), 75–84.

Ullah, B., Trevelyan, J., & Ivrisimtzis, I. (2015). A three-dimensional implementation of the boundary element and level set based structural optimisation. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 58, 176–194. <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2015.04.005>

Valencia, C. A. M. (2012). *Optimización Topológica en el diseño de elementos estructurales mecánicos*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Vargas, D. E. C., Lemonge, A. C. C., Barbosa, H. J. C., & Bernardino, H. S. (2016). Um algoritmo baseado em evolução diferencial para problemas de otimização estrutural multiobjetivo com restrições. *Revista Internacional de Métodos Numéricos Para Cálculo Y Diseño En Ingeniería*, 32(2), 91–99. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2015.02.003>

Vieira, P. C. S., & Silva, W. T. M. (2013). Análise elastoplástica de estruturas aporticadas com superfícies de interação obtidas por regressão linear múltipla. *Revista Internacional de Metodos Numericos Para Calculo Y Diseno En Ingenieria*, 29(3), 175–187. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.12.001>

W. Erwin Diewert. (2008). “cost functions,.” *The New Palgrave Dictionary of Economics*”.

Wang, Y.-F., Cheng, S., & Hsu, M.-H. (2010). Incorporating the Markov chain concept into fuzzy stochastic prediction of stock indexes. *Applied Soft Computing*, 10(2), 613–617. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2009.08.028>

- Xiong, J., Gu, D., Chen, H., Dai, D., & Shi, Q. (2017). Structural optimization of re-entrant negative Poisson's ratio structure fabricated by selective laser melting. *Materials & Design*, *120*, 307–316. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.02.022>
- Zhang, Y., & Mueller, C. (2017). Shear wall layout optimization for conceptual design of tall buildings. *Engineering Structures*, *140*, 225–240.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.02.059>
- Zhou, K., & Wu, Z. Y. (2017). Strain gauge placement optimization for structural performance assessment. *Engineering Structures*, *141*, 184–197.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.03.031>